

THESES

Présentées à
LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

Pour l'obtention du titre
de DOCTEUR de L'UNIVERSITE
de PARIS
—
(mention Sciences)

par

M. Chhatrapal SINGH
—
—

1971
—

Sujet de la 1ère Thèse : USURE PAR ABRASION DES OUTILS DE TRAVAIL DU SOL

Sujet de la 2ème Thèse : ANALYSES DES FORCES DE TRACTION DES MACHINES AGRICOLES

Soutenues le 02 JUIL. 1971 devant la Commission
composée de : —

Président

Monsieur le Professeur, R. SIESTRUNCK

Examineurs

}
Monsieur le Professeur, R. VICHNIEVSKY
Monsieur le Professeur, R. COMOLET
Monsieur l'Ingénieur en Chef, J. ACHART

PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT : D'UNIVERSITE

THESE DE :

NOM : Monsieur SINGH

Prénoms : Chhatrapal

né le 1^{er} Octobre 1936 à Allahabad

~~Delhi~~ Inde

1^{ère} THESE : " Usure par abrasion des outils de travail du sol ".

2^e THESE* (Propositions faites par l'Université) :

Analyse des forces de traction des machines agricoles.



Vu et Approuvé

PARIS, le 27 Juillet 1971

Le Président

de l'Université de PARIS VI

THESES

Présentées à

LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

Pour l'obtention du titre

de DOCTEUR de L'UNIVERSITE
de PARIS

(mention Sciences)

par

M. Chhatrapal SINGH

Sujet de la 1^{ère} Thèse : USURE PAR ABRASION DES OUTILS DE TRAVAIL DU SOL

Sujet de la 2^{ème} Thèse : ANALYSES DES FORCES DE TRACTION DES MACHINES AGRICOLES

Soutenues le devant la Commission
composée de :

Président

Monsieur le Professeur, R. SIESTRUNCK

Examineurs

} Monsieur le Professeur, R. VICHNIEVSKY
Monsieur le Professeur, R. COMOLET
Monsieur l'Ingénieur en Chef, J. ACHART



REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Centre National d'Etudes et d'Expérimentation de Machinisme Agricole sous la direction de Monsieur le Professeur R. VICHNIEVSKY que je remercie très respectueusement pour ses précieux conseils.

Je tiens à exprimer ma gratitude à la Direction et au personnel du CNEEMA pour leur accueil et l'aide qu'ils m'ont fournie pour compléter ma thèse.

Je tiens aussi à exprimer à Monsieur J. ACHART, Ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et Forêts, Chef du Service des Essais, l'expression de ma reconnaissance et de ma profonde gratitude pour avoir tout mis en oeuvre pour que le travail puisse se réaliser dans les meilleures conditions possibles.

Je remercie également Messieurs les Professeurs R. SIESTRUNCK et R. COMOLET qui ont bien voulu accepter de faire partie de la Commission d'Examen de cette thèse.

S O M M A I R E

INTRODUCTION	1
Chapitre 1 - L'USURE A L'ABRASION	2
A.- Points fondamentaux du phénomène d'usure par abrasion	2
B.- Les mécanismes de l'usure par abrasion	3
C.- Observations théoriques	4
1- Théorie de l'usure par abrasion par application directe de la force mécanique sur la particule abrasive	5
2- Théorie de l'usure par abrasion par application cinétique d'une force à une particule abrasive	6
D.- Influence des facteurs physiques, minérologiques et des conditions d'environnement sur les abrasifs et les surfaces abrasées	7
I. Effets des propriétés d'une surface abrasive sur l'usure des métaux	8
1- Influence de l'angularité et de la forme des grains abrasifs	8
2- Influence de la grosseur des grains abrasifs	8
3- Influence de la dureté des abrasifs	9
4- Influence de l'humidité sur l'abrasif	9
II. Effet des propriétés des métaux sur l'usure	10
1- Influence de la dureté des métaux	10
2- Influence de la structure	12
3- Influence de la teneur en carbone	13
4- Influence du module d'élasticité	13
5- Influence du traitement thermique	15
III. Influence du chemin parcouru	16
IV. Influence de la charge	17
V. Influence de la vitesse	18

D.- Méthodes et Machines d'essais	19
I. Essais à grande échelle dans les champs	20
II. Essais à petite échelle dans les champs	21
III. Essais sur appareils de laboratoire	21
IV. Machine d'abrasion sous faible contrainte	22
1- Machine avec récipient d'usure	22
2- Machine d'abrasion avec disque de caoutchouc	22
V. Appareils d'abrasion par affouillement	23
1- Machine d'usure avec disque abrasif	23
2- Machine à pointe et anneau	23
VI. Machines d'abrasion sous forte contrainte	23
1- Appareil d'abrasion Brinell	23
2- Appareil d'abrasion AMSCO	24
F.- Expression des résultats d'essais d'abrasion	24
Chapitre 2 - ABRASION SOUS FAIBLE CONTRAINTE	26
A.- Introduction	26
B.- Description de la machine	26
C.- Expériences	27
I. Echantillons	27
a) Etat de surface	27
II. Abrasif	27
III. Indice d'usure	27
D.- Résultats et conclusions	27
I. Influence de la vitesse des échantillons dans l'abrasif sur l'usure	27
II. Influence de la dureté et du module d'élasticité sur la résistance à l'abrasion des métaux	29
Chapitre 3 - ABRASION SOUS FORTE CONTRAINTE	34
A.- Introduction	34
B.- La Machine	34
C.- Essais et résultats	35

Digitized by the Internet Archive
in 2026

I. Echantillons	35
II. Abrasif	35
III. Reproductibilité des essais	37
IV. Effet de la vitesse de glissement sur l'intensité de l'usure	37
V. Effet de la charge sur l'intensité de l'usure	39
Chapitre 4 - ABRASION DANS LE CHAMP	41
A.- Introduction	41
B.- Méthode d'essai	41
I. Echantillons	41
II. Le champ	42
C.- Expériences et résultats	42
I. Effet de la vitesse sur l'usure	43
II. Effet de la vitesse sur la force de traction	47
III. Effet des forces de traction sur l'usure	47
CONCLUSION	49
BIBLIOGRAPHIE	50

I N T R O D U C T I O N

L'usure des composants et des outils a pour résultat, à l'échelle mondiale, une énorme perte, du point de vue économique, ainsi qu'un gaspillage de ressources naturelles. Tout effort visant à limiter ces pertes est vraiment intéressant.

En machinisme agricole, on rencontre de nombreuses formes d'usure et certaines font partie du machinisme agricole en général. Par contre, d'autres, comme l'usure par abrasion, sont propres aux techniques agricoles, car elles sont en étroite relation avec le sol, les récoltes, les engrais, etc ... L'usure par abrasion se produit lorsque des particules dures, telles que du sable, des fragments de roches ou de certains métaux durs glissent ou roulent, avec une certaine pression sur une surface. Cette action a tendance à creuser des sillons sur la surface du métal, à peu près de la même façon qu'un outil coupant.

L'usure par abrasion a une importance considérable pour chaque partie qui est en mouvement par rapport à un abrasif. Les outils qui sont en contact avec le sol, tels que les charrues, les cultivateurs, les lames de grattoir et de bulldozer, sont conçus pour opérer dans des abrasifs. La solution au problème de l'usure avec ces outils peut dépendre du choix des matériaux, et des modifications de leur dessin, pour assurer une usure, moins grande, sans augmenter les risques de détérioration par d'autres causes, comme la fatigue au choc ou la corrosion.

Jusqu'à présent, la plupart des travaux sur l'usure ont été effectués au laboratoire, et le plus souvent sur des papiers abrasifs. Ces essais ont fait l'objet de toutes les explications théoriques.

Mais, au cours de nos travaux, nous allons maintenant essayer d'étudier le phénomène d'usure par rapport à :

- 1.— La pression entre les particules abrasives et la surface d'usure
- 2.— La vitesse et la direction du mouvement de l'abrasif par rapport à la surface d'usure,

dans les conditions que l'on trouve réellement dans les champs et de les comparer avec les méthodes utilisées au laboratoire.

C H A P I T R E I

L'USURE A L'ABRASION

L'usure peut être définie comme l'enlèvement involontaire de matière solide de surfaces en frottement. Cette définition qui semble très simple, inclut en fait un bon nombre de phénomènes divers, tels l'abrasion, la corrosion, le "*galling*" (frottement), etc ... Chaque exemple précis d'usure peut contenir tous ces phénomènes agissant soit séparément, soit en combinaison. Dans ce dernier cas, la situation peut devenir encore plus complexe à cause de l'interaction de plusieurs phénomènes. L'oxyde d'un métal dur par exemple, formé par corrosion sur une surface d'acier peut agir ensuite comme abrasif fin et user les deux surfaces.

Il semble donc que la meilleure façon d'envisager le problème de compréhension et d'approche de l'usure est de reconnaître que le concept "*usure*" inclut en fait au moins quatre phénomènes à peu près distincts et indépendants, dont le seul point commun est d'enlever de la matière aux surfaces en frottement. Au lieu de parler simplement d'usure, il sera donc utile à la clarté de nos idées de reconnaître les types d'usure suivants (1) :

- 1.— Usure par adhésion ou frottement ;
- 2.— Usure par abrasion ou coupure ;
- 3.— Usure par corrosion ;
- 4.— Fatigue de la surface ;
- 5.— Autres types.

Ici nous ne considérons que le cas de l'usure par abrasion.

A.— POINTS FONDAMENTAUX DU PHÉNOMÈNE D'USURE PAR ABRASION

L'action d'une particule dure sur une surface, sous l'influence d'une force oblique par rapport à la surface est en général appelée usure par abrasion. L'action réciproque de la particule (possédant une grande force de pression) et de la surface est tout à fait semblable à l'action réciproque d'un outil coupant et d'une pièce travaillée en outillage. Dans le cas d'une matière ductile, chaque particule abrasive coupante enlève une particule à la surface. Les paramètres qui sont importants dans la coupe des métaux, doivent l'être également dans l'usure par abrasion. Cependant, de même que dans le cas d'un broyeur, il

est difficile d'indiquer avec précision la position des facettes coupantes des particules abrasives à cause de leur forme imprévisible.

L'usure par adhésion diffère de l'usure par abrasion (2,3) parce qu'elle est produite par le frottement sans intermédiaire de deux surfaces. Il y a usure adhésive lorsque les aspérités en contact de surfaces adjacentes se soudent et que l'action réciproque résultante peut aboutir à l'enlèvement de matières des surfaces. Dans le cas d'usure abrasive, toutefois, la matière, comme on l'a vu précédemment, est enlevée des surfaces par action coupante de particules abrasives. Pour que l'effet de coupe ait lieu, il est indispensable que la dureté des grains abrasifs soit supérieure à celle de la surface abrasée. Dans le cas où la force de pression de l'abrasif est très grande, la méthode d'enlèvement de matière peut se trouver un peu différente de celle d'un simple effet de coupe.

B.— LES MECANISMES DE L'USURE PAR ABRASION

La force composante perpendiculaire à la surface agit sur les particules dures en les enfonçant dans la surface. La force composante parallèle à la surface est à l'origine d'un mouvement tangentiel relatif de la particule et de la surface. Ces actions provoquent sur la surface des cisaillements, des rayures ou des éclats qui la marquent profondément. Le cisaillement est produit dans les surfaces ductiles par des grains durs qui ont des facettes à bord tranchant. Il se présente sous la forme d'un copeau ininterrompu coupant le métal et qui enlève de la matière de la surface. Des particules qui ont des bords émoussés ou des facettes arrondies ne font que rayer la surface ductile. Au cours de cette action, la surface du métal est poussée transversalement à la direction du mouvement de la particule et un sillon se forme. La plus grande partie de la matière ainsi enlevée, a plutôt tendance à s'entasser à l'extrémité du sillon qu'à être éliminée de la surface. Dans le cas d'un matériau cassant, le sillon est formé par une fissure et il s'ensuit un écaillage complet de la surface.

L'ampleur de l'usure produite de cette façon dépendra en grande partie, pour un matériau et un abrasif donné de l'importance des forces agissantes. Howard-Avery (4) a établi un classement de l'usure par abrasion en trois catégories qui dépendent de la grandeur des forces :

- 1.— Abrasion sous faible contrainte (scratching ou érosion)
- 2.— Abrasion à la gouge ou afouillement (gouging)
- 3.— Abrasion sous forte contrainte (grinding)

Lorsque les forces sont faibles, le taux d'usure par particule abrasive est également faible. Si alors ce mécanisme concerne des particules indifféremment fixes ou mobiles, on l'appelle "*scratching*". Au cours de l'usinage par outil, ce phénomène prend le nom de polissage (*polishing*) et d'érosion dans le cas où des particules libres en circulation attaquent une seule surface. Au cours de l'érosion, l'usure globale peut être élevée si la vitesse et le nombre des particules abrasives sont élevés.

Ce type d'usure par abrasion est celui des socs de charrues dans un sol sableux (4,5).

Lorsque l'intensité des forces agissantes est plus élevée, le taux d'usure par particule abrasive l'est aussi et le mécanisme s'appelle alors abrasion ou gougeage (*gouging*), si aucune particule n'entre en jeu. Lorsque des particules libres se trouvent entre deux surfaces glissantes (particules libres enfermées), on désigne ce type d'abrasion par "*lapping*" dans le cas d'usinage d'outils. Cette usure par frottement de particules libres, entre elles et sur deux surfaces fixes est moins importante que celle provoquée par le frottement réciproque de deux surfaces, à cause de la tendance des particules libres à rouler sans couper dans 90 % des cas (6).

Si la pression appliquée à l'abrasif est assez grande pour dépasser sa force de pression, ce type d'abrasion s'appelle meulage (*grinding*). Considérons un abrasif initialement de petite taille que l'on a broyé. Lorsque l'abrasif est écrasé, le phénomène d'enlèvement de matière peut être différent de celui du simple effet de coupe. L'abrasif a peu d'occasion de rouler ou de couper avant d'être écrasé. L'effet principal sur la surface abrasée proviendra alors de la force de compression concentrée au point de contact avec l'abrasif. Dans le cas d'un matériau ductile, la surface sera plastiquement déformée par l'abrasif et une empreinte se formera par enfoncement. Lorsque les empreintes sont très rapprochées, la pièce peut prendre du jeu et même tomber à cause de la détérioration. Il faut aussi envisager le cas où, l'abrasif en train de se rompre aura une action coupante, la force de coupure étant fournie par l'énergie élastique emmagasinée dans la particule d'abrasif comprimée. La déformation plastique de la surface d'un matériau dur sera faible. L'usure peut alors provoquer des fissures de la surface du matériau.

C.— OBSERVATIONS THEORIQUES

Il n'y a pas de théorie quantitative de l'usure parce que les facteurs responsables varient trop d'un système de frottement à l'autre. La seule théorie qui existe est purement formelle, puisqu'elle ne tient pas compte du tout des actions réciproques essentielles, physiques et chimiques, au point de contact réel. Elle est cependant nécessaire, car elle attire l'attention

sur les caractéristiques de l'usure relevant d'une interprétation mécanique et définit ainsi la partie du problème qui nécessite une explication plus poussée.

Les mêmes idées fondamentales se retrouvent dans tous les types d'usure par abrasion, exception faite peut être, du cas où la particule abrasive est écrasée.

Les différentes façons de soumettre les particules abrasives à une force peuvent être divisées en deux catégories :

- 1.- L'application mécanique directe de la force par la surface dans le cas de particules libres enfermées ou par l'appareil abrasif et la surface dans le cas de particules fixes. Cette catégorie d'application d'une force se retrouve dans l'abrasion à la gouge, le meulage (grinding) et l'abrasion par scratching.
- 2.- L'application cinétique de la force résultant de l'énergie cinétique d'une particule abrasive en mouvement qui heurte une surface. L'érosion fait partie de cette catégorie, qui est celle du traitement des abrasifs dans un système pneumatique ou liquide, d'une soufflerie de sable, etc ... Ce type d'application d'une force n'est sans doute pas aussi répandu que le premier.

1.- THEORIE DE L'USURE PAR ABRASION PAR APPLICATION DIRECTE DE LA FORCE MECANIQUE SUR LA PARTICULE ABRASIVE

Quelques auteurs ont étudié ce type d'usure (6 - 11) et tous acceptent les résultats de la théorie simplifiée qui se résume dans la formule ci-dessous :

$$v = \frac{dV}{dl} \propto \frac{P}{H} \quad (1)$$

v = taux d'usure du volume par unité de longueur

V = volume balayé par l'abrasif

l = longueur du glissement

P = charge

H = dureté de la surface du matériau

La figure (1) représente l'image idéale de ce type d'usure. L'équation précédente suppose que les particules abrasives sont plus dures que la surface abrasée et qu'elles sont rigides, c'est-à-dire non écrasées. Cette équation est valable pour une particule abrasive dont la taille " D " est supérieure à 70 microns. Si " D " est inférieur, " v " en dépend aussi.

Fig.1- IMAGE IDEALE d'ABRASION avec application directe d'une force sur la particule abrasive

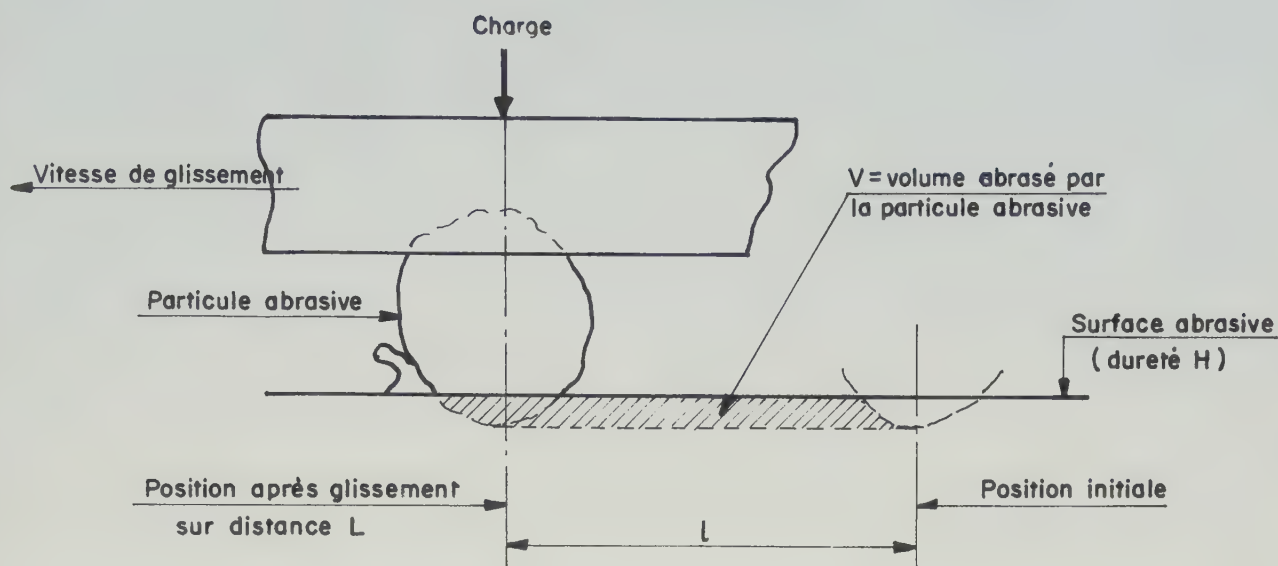
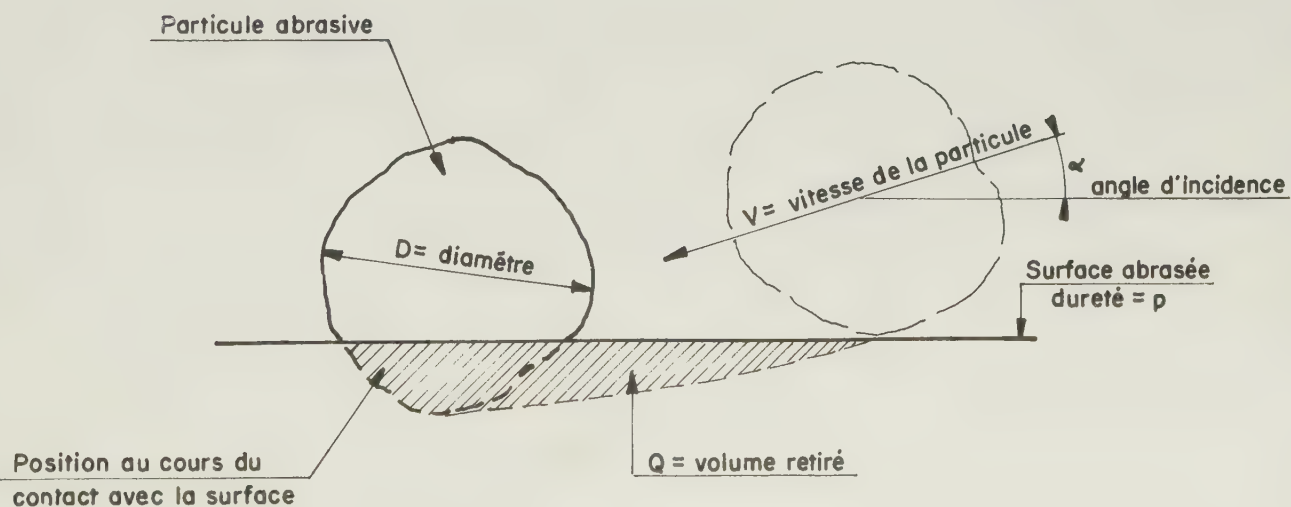


Fig.2- IMAGE IDEALE d'ABRASION avec application cinétique d'une force sur la particule abrasive (érosion)



Il faudra aussi tenir compte du rapport entre les particules coupantes et les particules non coupantes.

Krushtchov' et Babichev (12), Goddard et Willman (8) constatent que dans le processus d'abrasion, la majorité des rayures est imprimée sous forme de rayures qui ne contribuent pas à l'usure, mais à l'écaillage de la surface du matériau. Une minorité d'effluents produite par l'orientation favorable des facettes des grains abrasifs provoque l'usure en enlevant des copeaux métalliques.

Mulhearn et Samuels (7) ont montré que dans le processus d'abrasion sur toile de carbure de silicium, 12 % seulement des grains abrasifs sont dans la position où ils provoquent l'usure tandis que le restant des grains supporte la charge, mais ne provoque pas d'usure. D'autre part Bowden et Tabor (13) ont constaté que l'usure produite est équivalente à 10 % du volume des rayures tracées par les grains abrasifs.

La forme de la particule est un paramètre qui peut aussi être important, mais qui n'est pas compris dans l'équation (1). La résistance à l'usure d'aciers traités à chaud est fonction aussi bien de leur limite d'élasticité que de leur dureté. La fatigue de la surface peut avoir aussi de l'importance. Dans le cas de matériaux cassants, le taux d'usure peut être supérieur car il faut envisager la formation de fragments usés ayant un volume total plus grand que le volume balayé par la particule abrasive (6, 8)

2.- THEORIE DE L'USURE PAR ABRASION PAR APPLICATION CINETIQUE D'UNE FORCE A UNE PARTICULE ABRASIVE (érosion)

Dans ces conditions, l'énergie cinétique de la particule est dissipée sur une surface ductile sous forme d'un travail plastique qui est à l'origine d'une déformation ou d'un cisaillement de la surface. Une afoliation en forme de couches apparaît sur la surface dans le cas de déformation. Dans le cas du cisaillement, le matériau est affouillé à la surface. Si le matériau est cassant, l'énergie cinétique de la particule est propagée suivant une fissure qui provoque des éclats à la surface.

Le volume "Q" arraché à une surface ductile par une masse "M" de particules abrasives angulaires avec une vitesse "V" est donnée par Finnie (14) dans l'équation :

$$Q \propto \frac{MV^2}{P} F(\alpha) \quad (2)$$

dans laquelle :

V = vitesse de la particule

α = angle d'impact de la particule calculé par rapport à la surface abrasée.

La figure (2) représente l'image idéale de ce type d'usure. Dans une étude plus récente de ce type d'usure, Bitter (15, 16) tient compte des propriétés élastiques des particules abrasives et de la surface abrasée.

Le volume provenant d'une surface cassante soumise aux mêmes conditions de choc, celles-ci n'étant pas forcément limitées aux particules angulaires, est donnée par l'équation suivante (Bitter) :

$$Q \propto \frac{M (V \sin \alpha - K)^2}{e} \quad (3)$$

$$K = y^{5/2} \left(\frac{1}{D}\right)^{1/2} \left[\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1 - \mu_2}{E_2} \right]$$

$$e \propto \frac{y^2}{E_2}$$

y = limite d'élasticité

μ = module de Poisson

E = module d'élasticité

D = diamètre de la particule

K = vitesse du choc à laquelle la limite d'élasticité est atteinte

e = énergie nécessaire à arracher une unité de volume de la surface

Les indices 1 et 2 se rapportent respectivement à la particule et à la surface.

L'équation (3) suppose que la particule pénètre dans la surface à une profondeur égale à une fraction seulement de son propre diamètre.

Dans le cas d'une particule anguleuse, Bitter (15) démontre que l'on peut admettre que la particule a une densité apparente plus élevée.

D. — INFLUENCE DES FACTEURS PHYSIQUES, MINÉRALOGIQUES ET DES CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT SUR LES ABRASIFS ET LES SURFACES ABRASÉES

Pour connaître les différents facteurs dont l'usure dépend, il faut considérer la surface solide et l'abrasif lui-même.

I. — EFFET DES PROPRIETES D'UNE SURFACE ABRASIVE SUR L'USURE DES METAUX

On a montré que certaines caractéristiques physiques de l'abrasif avaient un effet prononcé sur sa capacité d'user la surface d'une machine. Au cours des essais d'abrasion en laboratoire, le pouvoir d'abrasion diminue au fur et à mesure que l'état des grains abrasifs change. Krushtchov et Babichev (17) ont constaté qu'à la fin de leurs essais, l'abrasivité de leur toile abrasive avait diminué considérablement. Cette diminution est de l'ordre de 60 % lors de l'abrasion de l'acier 40 et de l'ordre de 75 % lors de l'abrasion de l'acier trempé 9 Khs.

1. — Influence de l'angularité et de la forme des grains abrasifs

On a démontré que la forme ou degré d'angularité des particules abrasives était importante. Haworth (18) a découvert que les particules angulaires d'un matériau doux produisent une usure plus grande que les particules arrondies d'un matériau plus dur. Ainsi, il a découvert que les pertes de poids obtenues avec le feldspath, qui est plus doux que le quartz, peuvent être plus grandes quand les morceaux de feldspath sont plus anguleux. L'angularité s'atténue quand la résistance à l'abrasion augmente.

2. — Influence de la grosseur des grains abrasifs

Plusieurs chercheurs ont formulé des remarques en ce qui concerne l'influence de la granulométrie de l'abrasif, tout au moins dans le domaine des appareils de laboratoire. Avient, Goddard, Willman (10), Burwell (1) et Borghei (19) ont découvert que l'abrasivité croît très rapidement avec le diamètre des particules abrasives et qu'elle tend vers une valeur constante quand le diamètre des particules atteint une certaine grandeur. Mais Nathan et Jones (20) ont découvert que pour tous les matériaux, l'usure croît linéairement jusqu'à 70 microns et que la pente décroît entre 70 et 150 microns. Au-delà de 150 microns, la relation linéaire est à nouveau rétablie. Ils ont aussi démontré que l'usure décroît avec la diminution de la charge, selon la taille des particules abrasives. Pour des valeurs faibles de la charge, la pente est si faible qu'elle peut être considérée comme nulle. C'est la raison pour laquelle Rabinowicz et ses collaborateurs (6) sont parvenus à la conclusion que l'usure par abrasion est indépendante du faible diamètre de la particule abrasive.

Par suite des frottements, les grains se cassent et s'émoussent, ce qui produit un changement continu important de l'abrasivité au cours des essais, et comme ce changement est plus accentué dans le cas de grains plus gros, on ne peut pas les utiliser.

H. Avery (21) a également constaté que l'usure de la fonte austénitique au chrome lors de l'abrasion avec le silice

N° 50 est de 10,4 fois plus élevée que pendant l'abrasion avec la poussière de silice. Il a également constaté que le classement des différents matériaux au point de vue de la résistance à l'usure, peut être inversé selon l'utilisation d'abrasifs gros ou fins.

3.- Influence de la dureté des abrasifs

La dureté de la particule abrasive est évidemment très importante et elle a une valeur minimum qui doit être sensiblement supérieure à la valeur de la plus tendre des deux surfaces en frottement. En plus, sa dureté par rapport à celle des deux surfaces en frottement décidera de la forme d'existence des particules, soit libres et en mouvement entre les deux surfaces, soit encastrées dans la plus tendre des deux surfaces qui joue le rôle de meule par rapport à l'autre (1).

Krushtchov et Babichev (12) estiment que l'usure par abrasion augmente jusqu'à ce que la dureté de l'abrasif atteigne 1,4 à 1,6 fois celle du métal et qu'ensuite elle reste constante (Fig. 3). Mais la dureté minéralogique est un critère insuffisant. Des différences de teneur en silice libre dans un calcaire par exemple, ne changent pas sa dureté mais modifie profondément son caractère abrasif (Maratray).

Stauffer (22) et Finnie (14) ont constaté que dans le cas où la dureté de l'abrasif est voisine de celle du métal, le phénomène de polissage se produit, car une particule ayant des arêtes tranchantes et des bords anguleux est capable de rayer une surface plane de même dureté.

4.- Influence de l'humidité sur l'abrasif

Les outils de travail du sol sont soumis à l'usure par les particules abrasives de la terre qui contient de l'eau dans laquelle sont dissouts les gaz, les matières organiques et minérales.

Borghei (19) suppose que la solution de la terre peut avoir une réaction acide, neutre ou basique; ses propriétés peuvent donc exercer une influence sur les caractères et l'intensité de l'usure pendant le travail du sol.

On sait parfaitement que l'usure par broyage humide est plus élevée que par broyage sec. Mais le phénomène est très complexe et jusqu'à maintenant inexpliqué. La corrosion peut jouer un rôle assez important.

Krushtchov et Babichev (23) ont démontré que l'usure d'un acier dépend fortement de la nature de l'eau utilisée et de la substance dissoute dans cette eau. En ce qui concerne l'usure des socs de charrues, on a constaté (12) que l'intensité de l'usure peut varier de 0,002 à 0,18 micron/m suivant les différents points de la surface du soc. Cette opinion est formulée en supposant que

toute la surface du soc est plus affectée par la solution du sol que les bords coupants et la pointe, et présente donc un taux d'usure plus élevé.

Par contre Maratray (24) constate que parfois, l'usure est moindre en présence d'humidité. En broyant un quartz humide avec un petit broyeur à machoires, l'usure a été inférieure de 26 %.

Karatish (25) a aussi trouvé que pour des socs, l'usure augmente considérablement quand l'humidité diminue dans la terre irrigable. Cela provient de l'augmentation de la force de cisaillement de la terre et de la diminution de l'humidité.

Krushtchov et Babichev (17) ont aussi faits des essais sous forte contrainte et ont trouvé que la présence ou l'absence d'eau modifie peu le taux d'usure. Cette indépendance est attribuée à la haute intensité et à l'épaisseur de la couche d'usure ; on peut comparer ces résultats à ceux d'Avient, Goddard et Willman (10). Quand l'intensité de l'usure est très faible, les propriétés du milieu aqueux sont très importantes. Une telle usure est donc dominée par la propriété du film formé à la surface du métal à la suite d'interaction avec le milieu et non par la propriété mécanique du métal de base. Lorsque l'intensité de l'usure est plus élevée, l'action de l'eau est négligeable. Le volume de métal enlevé provient de l'intérieur et dépend des propriétés du métal de base. On pense que dans ces conditions, l'épaisseur de la zone superficielle chimiquement active est trop faible pour intervenir.

II.— EFFET DES PROPRIETES DES METAUX SUR L'USURE

1.— Influence de la dureté des métaux

En général, pour augmenter la résistance à l'usure par abrasion d'une surface métallique, on ne peut qu'accroître sa dureté. Mais le module d'élasticité, que nous verrons plus tard, est également important pour l'étude de la résistance à l'usure des métaux.

Krushtchov et Babichev (26) ont découvert que la résistance à l'usure relative des métaux purs non trempés et des aciers recuits est liée à la dureté "H" dans la formule suivante :

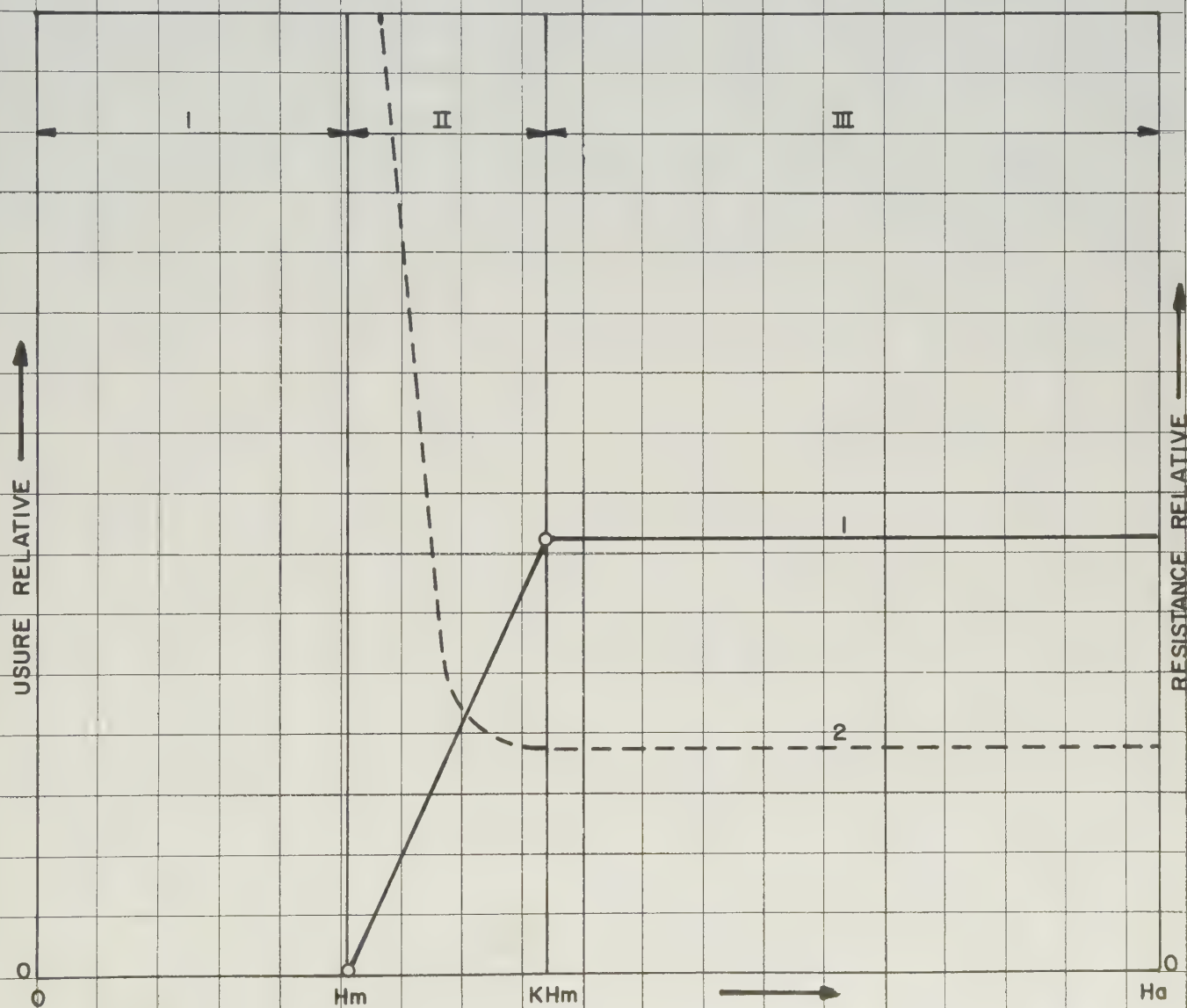
$$\epsilon = bH \quad (3)$$

b = coefficient de proportionnalité

H = dureté

La résistance à l'usure relative du carbone pur des alliages des aciers de construction et de certains aciers d'outillage examinés après la trempe et la recuisson, augmente linéairement avec la dureté.

Fig.3 - EFFETS du RAPPORT de la DURETE
de l'ABRASIF et du METAL sur
l'USURE et la RESISTANCE RELATIVES



La relation entre ϵ et " H " pour ces matières peut être exprimée ainsi :

$$\epsilon = \epsilon_0 + b' (H - H_0) \quad (5)$$

ϵ_0 = résistance relative à l'usure de l'acier recuit

b' = coefficient de proportionnalité

H_0 = dureté de l'acier recuit.

La résistance relative à l'usure des métaux et des aciers durcis par un travail mécanique, est indépendante de la dureté produite par le durcissement ou diminue légèrement avec l'augmentation de la dureté. Le fait que la résistance des métaux et des aciers à l'usure par abrasion ne dépend pas du degré de trempe montre que au cours du processus d'usure, il y a un effet limite de durcissement qui précède la fracture.

Dans cet ordre d'idée, Richardson (27, 28) établit une corrélation entre la résistance à l'abrasion et la dureté maximale atteinte après écrouissage. L'usure relative des métaux est à peu près proportionnelle à la dureté " H_0 " du métal fortement écroui.

Larsen-Bodse (29) a étudié la résistance à l'abrasion des aciers au carbone. Il trouve, en accord avec Richardson (28), que la résistance à l'abrasion dépend de la dureté et du coefficient d'écrouissage. La corrélation entre la dureté globale et la résistance à l'abrasion reste valable aussi longtemps que le coefficient d'écrouissage reste constant au cours de la formation de l'empreinte de dureté et de la couche abrasée, sinon la dureté globale doit être remplacée par la micro-dureté de la surface abrasée.

Savitskyi (39) montre que les différents moyens d'augmenter la dureté des alliages ne sont pas équivalents au point de vue de l'augmentation de la résistance à l'usure. Dans le cas d'un acier au carbone, le moyen le plus efficace est la consolidation par addition d'éléments d'alliage et l'augmentation de la teneur en carbone. Par contre, l'augmentation de la dureté par traitement thermique est un moyen moins efficace. La consolidation et l'augmentation de la dureté par le travail à froid ainsi que l'écrouissage, n'exercent pas une influence importante sur la résistance à l'usure de l'acier.

Ainsi, on peut constater que la dureté d'un alliage quelconque ne peut pas être considéré comme un critère suffisant de la résistance à l'usure, si on ne tient pas compte de son état structural, du type des liaisons interatomiques dans la matrice de l'alliage et de son traitement thermique. Par conséquent, pour une valeur donnée de la dureté, un alliage consolidé différemment peut résister différemment à l'usure.

Rabinowicz (31), d'après la formule d'usure :

$$\frac{dV}{dL} = \frac{P \cotg \theta}{\pi H} \quad (6)$$

montre que le taux d'usure est inversement proportionnel à la dureté, mais dans le cas particulier des aciers au carbone, l'usure est fonction à la fois de la dureté et de la limite d'élasticité.

$$E^a \times H^b = C w^{-1}$$

où : $a \log E + b \log H = \log C - \log w$

w = taux d'usure

H = dureté

E = limite d'élasticité

D'après lui, en ce qui concerne un acier de composition chimique donnée ayant subi un traitement thermique, la résistance à l'usure peut être fonction unique de la dureté, tandis que quand il s'agit des aciers avec différentes compositions, deux aciers ayant la même dureté peuvent avoir une résistance à l'usure différente.

2.- Influence de la structure

L'influence de la structure de la surface abrasée sur la résistance à l'usure n'est pas tout à fait évidente. (Borghesi) (19) Certains auteurs pensent qu'un métal résistera d'autant plus à l'abrasion qu'il contient davantage de micro-éléments durs. Les structures perlitiques sont moins résistantes que les structures martensitiques et les structures austénitiques auraient aussi une résistance moindre, mais cela est contestable (24).

Rosenblatt (32) a démontré que la structure martensitique offre une meilleure résistance à l'abrasion, en particulier dans le cas d'abrasion sous forte contrainte avec des abrasifs ayant une dureté peu élevée. Howarth (18) a montré que la résistance à l'abrasion d'un acier ou d'une fonte pour une quantité constante de carbure initiale (cémentite) peut être augmentée par l'addition du chrome et du nickel afin d'obtenir une matrice martensitique. Ceci est dû à la réduction du taux de la transformation d'austénite résiduelle et à la maintenance de la martensite pendant le processus de refroidissement.

Cette méthode de changement de la matrice constitue la base de la fabrication de la fonte Ni-hard dans laquelle 2,5 à 5 % de Ni sont additionnés à 1,5 à 2 % de Cr, quantités suffisantes à cette transformation.

Rosenblatt a montré que seule la micro-structure et par conséquent la mesure de la micro-dureté, peut être prise comme critère de résistance à l'abrasion. Il a démontré l'existence d'une proportionnalité entre les taux d'usure et la dureté microscopique Brinell. Il pense que ceci est dû à l'hétérogénéité et à l'existence des diverses phases dures dans la structure. En augmentant la teneur en carbone, il arrive à une structure plus homogène et à une diminution de l'écart entre les deux propor-

tionnalités : micro-dureté - taux d'usure et dureté - taux d'usure. Il conclut donc que la micro-dureté des phases dures et les propriétés de la matrice sont des facteurs importants dans l'étude de l'abrasion.

L'importance de la grosseur et de la distribution des phases dures a été montré par Haworth (33) en comparant la résistance à l'abrasion d'un acier ayant une forte teneur en carbone et en chrome avec les alliages moulés de la même façon. Dans les alliages moulés, le carbure est faiblement distribué, tandis que dans l'acier forgé, le carbure est plus uniformément réparti, ce qui le rend plus résistant à l'abrasion.

3.- Influence de la teneur en carbone

La résistance à l'abrasion est d'autant plus élevée que la teneur en carbone est plus grande. Elle ne varie pas aussi longtemps que la température de revenu ne dépasse pas 125°C environ. Mais pour des températures entre 155°C et 250°C, la résistance à l'abrasion baisse rapidement (24). Dans ce domaine de température, le carbure perd sa cohésion avec la matrice dans les aciers à plus de 0,70 % de carbone. Au-delà de 250°C, l'usure est une fonction linéaire de la température absolue de revenu.

Norman (34) a montré que la résistance à l'abrasion des structures martensitiques augmente avec la teneur en carbone. Le taux d'usure s'accroît rapidement quand la teneur en carbone tombe au-dessous de 0,6 %. Aux teneurs plus élevées en carbone, la microstructure martensitique contient un certain pourcentage d'austénite résiduelle et de carbure non dissouts ; ces derniers ont un effet mineur quoique non négligeable.

Haworth (18) a montré que la résistance à l'abrasion de la fonte augmente quand la teneur en carbone passe de 2 à 3 %. Il pense que ceci est dû à l'augmentation de la quantité de cémentite dans la fonte. Dearden et Swindale (35) considèrent que la teneur en carbone d'un acier est plus important que la dureté dans la détermination de la résistance à l'abrasion.

4.- Influence du module d'élasticité

Oberle (36) fait remarquer que calculer la déformation élastique que la surface peut supporter serait sans doute une mesure plus juste de la résistance à l'usure par abrasion. En d'autres termes, la surface en question, en présence d'une particule abrasive dure, se déforme élastiquement pour s'écarter du chemin suivi par la particule. Mais lorsque la particule est passée, la surface reprend élastiquement sa configuration originale sans déformation plastique ou dommage permanent. Plus la limite élastique de tension est grande, meilleure devrait être la résistance de la surface à l'abrasion ou à une autre surface plus dure.

Oberle (36) a défini la limite élastique de tension "*Elim*" ou "*Modell*" comme étant le rapport entre la limite élastique de tension et le module d'élasticité "*E*". Il a été démontré aussi que la limite élastique de tension était proportionnelle, pour un grand nombre de matériaux, à la dureté de l'empreinte "*E*". Autrement dit :

$$Elim \propto \frac{H}{E} \quad (8)$$

Oberle (36) fonde sa démonstration sur les observations suivantes :

L'expérience montre que l'usure décroît avec l'augmentation de la dureté du matériau ; une diminution du module d'élasticité augmente l'union des parties et les charges spécifiques locales diminuent, ce qui conduit aussi à une diminution de l'usure.

Une autre solution a été proposée par Burwell (1) conduisant qualitativement au même résultat. Il estime que la quantité d'énergie élastique qui peut être stockée dans une partie de la surface proche de la surface abrasée est une mesure de sa résistance à l'usure abrasive. Plus la quantité d'énergie stockée est grande, plus sa résistance à l'usure est grande. L'énergie élastique qui peut être stockée par unité de volume "*E*" "*el*" dans un corps solide est proportionnelle au carré de la limite élastique de tension divisé par le double module élastique. En appliquant la même proportionnalité entre la limite élastique de tension et la dureté de l'empreinte, il obtient la formule suivante :

$$E_{el} \propto \frac{H^2}{2E}$$

On peut vérifier que qualitativement les expressions (8) et (9) sont équivalentes, car elles démontrent que la résistance à l'usure augmente avec la dureté et diminue avec l'augmentation du module élastique.

Krushtchov et Babichev (26) supposant que le module d'élasticité et le coefficient de rigidité d'une part, la résistance relative à l'usure et le carré du coefficient de rigidité d'autre part, sont directement proportionnels, admettent que le carré du module d'élasticité et la résistance relative à l'usure sont directement proportionnels. On peut s'attendre à une relation similaire entre le carré du module d'élasticité et la dureté.

La relation générale entre la résistance relative à l'usure et le module d'élasticité donnée par ces auteurs est la suivante :

$$\epsilon = 0,49 \times 10^{-4} E^{1,3} \quad (10)$$

ϵ = résistance relative à l'usure du métal

E = module d'élasticité du métal (en Kg/mm²)

On a découvert que la relation ci-dessus était valable dans le cas des matériaux métalliques et des minéraux, exception faite du Titanium, mais elle s'est révélée inutilisable dans le cas d'aciers traités à chaud où la résistance relative à l'usure est considérablement augmentée par le durcissement et où le module d'élasticité est légèrement plus faible (26).

Krushchov et Babichev (12) ont comparé la résistance à l'usure au "Modell" d'Oberle pour cinq matériaux, mais ils n'ont pas trouvé de correspondance parfaite entre les deux. Ils ont conclu qu'il était possible que l'index, sous la forme d'un rapport entre la dureté et le module d'élasticité, pourrait être utilisé pour déterminer la façon dont certains matériaux réagissent quelles que soient les conditions. Mais cet index est inutilisable pour établir la résistance à l'usure par abrasion.

Spurr et Newcomb (37) ont également découvert que le taux d'usure est inversement proportionnel au module d'élasticité :

$$V = K \frac{P}{E} \quad (11)$$

V = intensité de l'usure

P = masse

E = module d'élasticité

K = constante

5.- Influence du traitement thermique

Un certain nombre de chercheurs a étudié la résistance à l'abrasion de différents aciers sous l'action du sol en fonction de leur composition et de la forme de leur traitements thermiques.

Serpik et Kantor (5) ont montré que le traitement isothermique à une température déterminée, permet, à partir d'un mélange de carbure et de fer, la formation d'une structure très homogène présentant une quantité infime de fissures ultramicroscopiques. Par conséquent, il assure une plus grande résistance à l'abrasion que le traitement thermique conventionnel (trempe et revenu).

A partir d'une série d'essais d'abrasion dans le sol sur un certain nombre d'acier ayant des compositions différentes, Serpik et Kantor (5) ont prouvé la supériorité du traitement isothermique dans la résistance à l'abrasion. Les meilleurs résultats sont donnés par l'acier C 12 qui, après traitement isothermique, donne du troostite à structure aculéiforme ayant une grande résistance à l'usure par excès de carbure. Ils concluent que la dureté d'un acier ne peut pas être considérée comme caractéristique de sa résistance à l'usure. En effet les conditions de traitement thermique ainsi que la structure obtenue influent sur la résistance à l'abrasion.

Babichev (38) a montré que les petits changements dans le traitement thermique causent un grand changement dans la structure de l'acier, ce qui modifie sa dureté et sa résistance à l'usure.

La température de revenu après la trempe des aciers est aussi un facteur important de la résistance à l'abrasion. Soroko Novistkya (39) a trouvé que l'augmentation de la température de revenu de 200°C à 600°C des aciers ayant moins de 0,1 % de carbone n'affecte pas la résistance à l'abrasion mais diminue la dureté. Par contre, en ce qui concerne les aciers de teneur en carbone plus élevée, cette augmentation de la température de revenu fait diminuer à la fois la résistance à l'abrasion et la dureté. Ceci est dû à la diminution de la ténacité et par conséquent à l'augmentation des débris d'usure enlevés qui sont plus grands que le volume des rayures.

Tabor (13) a montré que dans les aciers recuits (grande ténacité) la partie du métal déplacée par l'abrasif a des cotés arrondis à une grande distance de la rayure, tandis que dans les aciers trempés (faible ténacité) la partie du métal déplacée a des cotés en saillie près du bord de la rayure. Dans l'abrasion, cet effet augmente le volume de l'usure des aciers trempés et diminue le volume de l'usure des aciers recuits.

III.- INFLUENCE DU CHEMIN PARCOURU

Presque tous les chercheurs qui ont travaillé sur l'usure par abrasion ont constaté une proportionnalité entre l'usure et le chemin parcouru. D'ailleurs, c'est pourquoi la plupart d'entre eux, rapportent leurs résultats d'essai d'usure à l'unité de chemin parcouru, ce qui est appelé "*taux d'usure*".

Le taux d'usure reste constant si l'abrasif n'est ni ventilé ni émoussé, sinon il diminue ainsi que le pouvoir abrasif.

Mulhearn et Samuel (7) dans le cas d'abrasion sur papier de carbure de silicium ont étudié la diminution du taux d'usure en fonction du nombre de traversée de l'échantillon sur le papier abrasif et sont arrivés à l'équation suivante :

$$M_n = M_{\infty} (1 - e^{-Bn}) \quad (12)$$

dans laquelle :

M_n = usure de la $n^{\text{ième}}$ traversée

M_{∞} = usure totale si l'abrasion continue indéfiniment

B = constante

D'après cette expression, on voit que le taux d'usure est initialement constant, mais que graduellement il tombe à zéro.

Mais d'après les expériences de Borghei (19) faites pour étudier la diminution du pouvoir abrasif, on peut constater que le taux d'usure diminue avec le temps.

Piggot et Willman (40) pensent de même et ont trouvé une formule exprimant l'usure pendant le temps de traversée :

$$V = \alpha \log KI \quad (13)$$

I = chemin parcouru

α et K = constantes

Ce qui entraîne que le taux d'usure est inversement proportionnel au chemin parcouru.

Welsh (41) se basant sur la courbe des temps d'usure des aciers au carbone, montre que le taux d'usure diminue au bout d'un certain temps de frottement. Ce changement est imputable au durcissement des surfaces pendant le frottement.

IV.— INFLUENCE DE LA CHARGE

D'après les équations relatives à l'usure, on peut constater que de nombreux chercheurs ont trouvé une proportionnalité entre le taux d'usure et la pression exercée par les grains abrasifs. Krushchov et Babichev (12), ont démontré que l'intensité de l'usure, dans des limites déterminées de variation de la charge spécifique, est directement proportionnelle à la taille de la charge spécifique et que la résistance à l'abrasion est indépendante de la charge. Cependant, Richardson (27) a découvert qu'une légère augmentation de la charge provoquait une faible diminution du taux d'usure par unité de charge. Krushchov et Babichev (12) ont abouti à l'équation suivante :

$$V = cP \quad (14)$$

où

V = quantité d'usure

P = charge

c = constante

La charge limite est déterminée soit par le début de la déformation à l'essai, soit par la stabilité mécanique de la surface abrasive.

Rosenblatt (32) montre que l'influence de la pression est à son maximum quand l'abrasif et le matériau sont doux. Il constate aussi que la pression et la dureté de l'abrasif n'ont aucune influence sur l'acier le plus dur.

Nathan et Jones (20) ont découvert une relation linéaire entre la charge et l'usure. Mais cette relation n'est pas valable dans le cas de particules de petites tailles lorsque la charge est supérieure à 2 Kg. La proportionnalité varie avec l'augmentation de la charge, parce que la profondeur de pénétration augmente

avec la charge et finit par endommager la résine qui colle les particules à la ceinture formée par les particules arrachées au cours de l'abrasion du spécimen.

Haworth (33), Reed et Gordon (42) ont aussi constaté qu'une proportionnalité existe entre le taux d'usure et la charge jusqu'au moment où les grains abrasifs sont écrasés.

Bowditch (43) conclut que la relation étroite existant entre les forces d'extraction et le taux d'usure pourrait être directement proportionnelle à la pression de contact du soc de charrue et du sol. Ceci serait en complet accord avec les expériences de l'usure des métaux sur papier abrasif.

Avient, Goddard, Willman (10), Spurr, Newcomb (37) et d'autres ont démontré qu'il existe une proportionnalité complète entre l'usure et la charge.

V.- INFLUENCE DE LA VITESSE

Tabor et Bowden (44) ont découvert que la température des surfaces de métal en frottement s'élève avec la vitesse de frottement jusqu'à ce que le point de fusion du métal soit atteint. Ensuite, elle devient indépendant de la vitesse. L'augmentation de la vitesse entraîne donc une augmentation de l'usure à cause de l'élévation de température du spécimen au cours de l'abrasion. Le taux d'élévation de température est supérieur pour les particules de grandes tailles.

Krushchov et Babichev (12) ont découvert sur la machine KH 4 B que l'usure est indépendante des vitesses de 9 à 68 cm/s qu'ils ont adopté pour les essais classiques. L'usure aussi bien d'un acier dur que d'un acier doux, mis à l'essai pour un passage continu de 30 m à trois vitesses comprises entre 2, 3 et 274 cm/s, n'augmentait que de 13% ou moins. Ils en ont déduit que la température de frottement était, à ces vitesses, négligeable pour l'acier et que les résultats enregistrés dépendaient des propriétés de la surface abrasive.

Nathan et Jones (20) ont trouvé, au cours de leurs expériences que les spécimens étaient relativement chauds à des vitesses élevées et que la variation de volume de l'usure était grande. Cependant, à vitesse réduite, l'usure dépend peu de la vitesse. L'augmentation de l'usure à des vitesses élevées peut être attribuée plus à l'élévation de température qu'à la vitesse elle-même et le volume de l'usure à faible vitesse, sans interruption de l'essai, a des résultats à peu près indépendants de la vitesse.

Richardson (28) au cours d'un essai dans les champs, a découvert que l'effet de la vitesse sur l'usure était faible et que à 4 km/h, l'humidité du sol n'avait pas d'effet sensible en tant que refroidisseur. Il pense également que, pour les matériaux qu'il a essayé, il est peu probable que des volumes assez grands puissent atteindre approximativement la température de recristallisation, de façon à influencer l'usure par abrasion, à des vitesses de 9 à 24 cm/s.

Maratray (24) pense que dans les broyeurs giratoires, dans les domaines où le débit reste proportionnel à la vitesse, l'usure par abrasion semble aussi proportionnelle à la vitesse. Daignaud (45) montre aussi que l'usure est fonction directe de la vitesse dans la zone des petites vitesses.

Werner A. Stauffer (22) pense que l'usure correspond à la troisième puissance de vitesse particulièrement pour les grandes vitesses. Haworth (18) a constaté que l'usure augmente avec la vitesse. Mais le taux d'augmentation de l'usure en fonction de la vitesse est plus grand dans le cas d'abrasion sèche que dans le cas d'abrasion humide, et cette augmentation de l'usure est due à l'effet de l'augmentation de la température. D'autre part, Spurr et Newcomb (37) ont montré que le taux d'usure est directement proportionnel à la vitesse relative de l'échantillon.

E - METHODES ET MACHINES D'ESSAIS

On a dit très souvent que *"il n'y a pas d'essai d'usure universel"* et ceci s'applique aussi à l'usure par abrasion de matières étrangères. Les tests d'usure en laboratoire ne peuvent être considérés que comme des moyens préliminaires de sélection et peuvent conduire à des erreurs si on n'essaie pas le plus possible de recréer les conditions de service, en particulier, la dureté, la taille des particules d'abrasif, la pression entre les particules abrasives et la surface abrasée, la vitesse, la direction du mouvement de l'abrasif par rapport à la surface usée.

En conséquence, les conditions des essais d'usure doivent être spécifiées d'une manière très précise. Mais, si on considère les difficultés à obtenir dans les champs des essais donnant des résultats sérieux, les essais en laboratoire peuvent être très utiles pour définir les caractéristiques désirées d'un matériau dont on veut se servir en lui donnant une valeur avant les essais dans les champs.

Un essai d'usure devrait être fiable si on considère pour mesure la répétition de résultats exprimés en termes quantitatifs. L'uniformisation d'un essai d'usure est un procédé demandant du temps et de l'argent et pour être sûr que l'essai ne s'écarte pas de la *"norme"*, il est recommandé d'introduire un matériau standard qui servira de contrôle.

Les essais d'usure les plus utiles sont ceux pour lesquels la variation statistique de la perte de poids du matériau de contrôle sera dans les limites indiquant que le processus d'essai est bon.

Pour que l'usure par abrasion atteigne un taux significatif, il faut employer un abrasif véritable, c'est-à-dire un matériau plus dur que la partie de machine étudiée, et une forte pression. La taille et l'aguité des particules sont également très importantes, car l'usure augmente en général avec la taille de la particule. L'usure par abrasion est phénomène d'enlèvement de métal. La taille des sillons sur la surface usée dépend de la taille, de la forme et de la dureté de la particule abrasive, ainsi que de la pression à l'unité. Le taux d'usure relative des socs de charrue dans des

soils argileux ou sableux en est un exemple important. En fait, l'acier structuré ordinaire ne présente pas un taux d'usure sensible avec des matériaux très au-dessous de 4 d'après l'échelle de dureté de Moh (400 Brinell environ) y compris les minéraux, tels que le marbre, la dolomite, la calcite, le gypse, le talc, etc..., les minéraux complexes et les matières synthétiques. Le quartz (sableux) est le minéral préjudiciable le plus classique à cause de sa dureté, de son angularité qui lui fournissent des facettes coupantes, de sa force et parce qu'on le rencontre souvent. Les problèmes industriels de l'usure devraient être résolus assez facilement grâce à l'utilisation des données d'usure au laboratoire. Ils ne le sont pas à cause de deux problèmes qu'on ne peut ignorer et qui sont les suivants :

1- Les matériaux de grande dureté qui sont les plus résistants à l'usure par abrasion, sont cassants lorsqu'ils sont soumis à de grandes pressions. Les bords coupants et les chenilles des tracteurs sont donc durcis à un point dont la valeur représente un compromis entre la meilleure résistance à l'usure et la plus grande résistance à la rupture.

2 - Les variations de roche, de minéral et des conditions du sol d'une région à l'autre renversent souvent les résultats d'une étude de l'usure dans le champ faite avec soin. Le matériau convenant le mieux à une région rocheuse sera très souvent le moins intéressant dans un sol sableux ou formé d'abrasifs mobiles.

On peut donc diviser les méthodes utilisées pour les essais d'usure par abrasion des matériaux utilisés pour la construction de machines agricoles en trois catégories :

I.- ESSAIS A GRANDE ECHELLE DANS LES CHAMPS

Pour les différentes raisons citées ci-dessus, ce type d'essai est très important, mais assez limité. Ces essais sont très coûteux et prennent beaucoup de temps, et en général, leurs résultats ne sont pas sûrs. L'humidité et les propriétés mécaniques du sol varient selon le changement fréquent des conditions climatiques. Par conséquent, la profondeur de travail de l'outil et les forces de pression sur le sol varient. Il en résulte une variation considérable de l'usure. De différences de la texture et de la structure du sol de place en place entraînent également une variation de l'usure des outils agricoles.

Richardson (46) et de nombreux autres auteurs (25,43,48) ont effectué ce type d'essai. Richardson a donné la liste suivante de ce qui est nécessaire à un essai dans les champs à grande échelle:

- Un matériau standard doit être employé d'après lequel on classera les autres, pour que les résultats soient cumulatifs et pour pouvoir garder continuellement une vue d'ensemble.
- Il faut éliminer l'effet de la différence de forme en comparant la réponse à l'usure de divers matériaux.

- Les composants de l'essai doivent être homogènes dans la zone d'usure pour que le processus d'usure se rapporte à un matériau spécifique dont on peut étudier les propriétés mécaniques et métallurgiques.
- Les études dans le champ doivent se rapporter à un nombre de conditions définies. Il est donc nécessaire d'assurer un résultat dans une partie de terrain dont le type de sol et la condition du sol restent uniformes.
- Il faut employer une méthode statistique pour déterminer avec précision les données des résultats.

II.- ESSAIS A PETITE ECHELLE DANS LES CHAMPS

Cette méthode se place entre l'essai à grande échelle dans les champs et l'essai en laboratoire. Elle peut être réalisée soit sur une parcelle de terrain, soit dans un bac en laboratoire avec un appareillage spécial. Bien que le coût de construction d'un bac soit élevé, il serait avantageux de l'employer, car les conditions de climat et de sol peuvent être facilement contrôlées et les essais peuvent être poursuivis pendant toute l'année. L'appareillage sera le même que celui dont on se sert aux U.S. Tillage Machinery Laboratory pour mesurer les forces de pression des outils agricoles. Si l'essai est effectué dans une parcelle de terrain, l'appareillage consiste en un châssis sur lequel on peut attacher les pièces à essayer qui ont une forme géométrique simple (des plaques rectangulaires par exemple). Le châssis est monté sur quatre roues et traîné par un tracteur dans une zone de terrain bien déterminée et homogène pendant une durée assez courte après laquelle la perte de poids des échantillons est mesurée.

III.- ESSAIS SUR APPAREILS DE LABORATOIRE

Ils constituent la base principale de l'étude de l'abrasion et peuvent servir d'instruments de sélection des matériaux résistants à l'abrasion. Etant donné que les outils de travail du sol, suivant leurs formes et la nature du terrain sont soumis à différents types d'abrasion, la machine d'abrasion doit être choisie conformément au type d'abrasion.

Pour une étude complète d'abrasion en laboratoire, il faut faire appel à trois types de machines d'abrasion chacune d'après les essais cités ci-dessous :

- Essai d'abrasion sous faible contrainte
- Essai d'abrasion sous forte contrainte
- Essai d'abrasion par affouillement.

C'est seulement à partir de ces trois types d'essais d'abrasion qu'on peut juger si un matériau peut résister à l'usure du sol. Un soc de charrue, par exemple, pendant le labour dans le sol présente une forte usure de sa pointe et de son bord tranchant à cause de la pression très élevée exercée par la terre tandis qu'apparaissent successivement l'abrasion par affouillement et l'abrasion sous faible contrainte, sur sa surface supérieure au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bord tranchant.

Beaucoup de modèles de machines d'abrasion ont été construits conformément aux différents phénomènes d'abrasion pour l'étude de l'usure. Quelques uns sont cités ci-dessous :

IV.- MACHINE D'ABRASION SOUS FAIBLE CONTRAINTE

Dans ce type de machine l'abrasif frotte avec une faible pression sur la surface d'usure et l'intensité de l'usure est relativement plus petite et se rapproche de la forme de l'érosion. L'abrasif utilisé dans ces machines est granuleux, à l'état libre, et parfois mélangé à une combinaison d'eau et d'un liant quelconque. La particularité de cette sorte de machine est de permettre l'étude de l'abrasion humide ou sèche. Dans ces machines, l'usure est conforme au phénomène d'abrasion des surfaces d'outils de travail du sol comme le versoir du soc qui a une faible intensité d'usure.

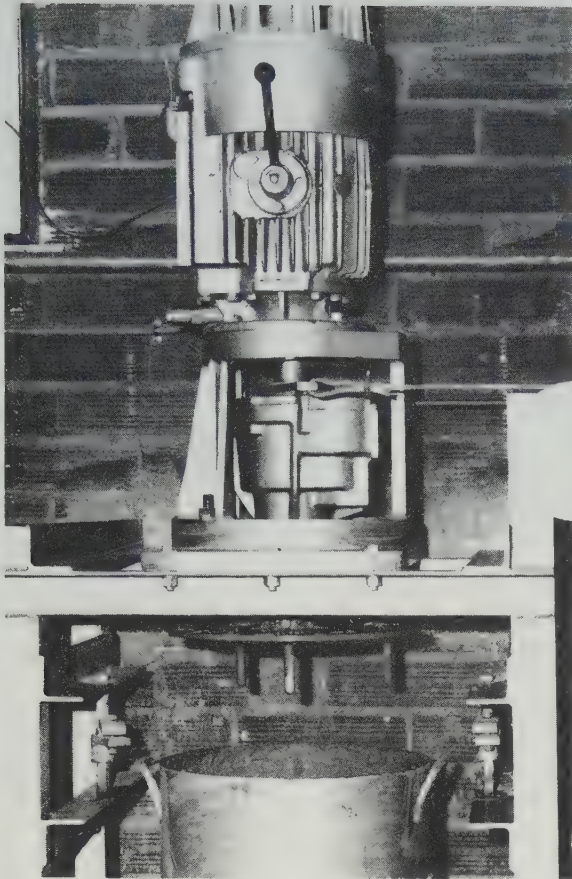
1)- Machine avec récipient d'usure :

Elle consiste en un récipient cylindrique contenant l'abrasif et en un plateau porte-échantillon monté directement sur l'arbre de sortie d'un moteur. Cette machine apparaît bien adaptée aux cas de l'étude par glissement sous différents degrés d'humidité avec une faible pression. Elle a été réalisée par Borghei (19) et par Stauffer (22) et Mayauskas (47), dont le principe est montré dans la figure 4. L'échantillon métallique à essayer est de forme cylindrique. On le fait tourner dans une boue abrasive. L'échantillon est fixé sur un plateau horizontal qui tourne sous l'action d'un arbre venant du moteur.

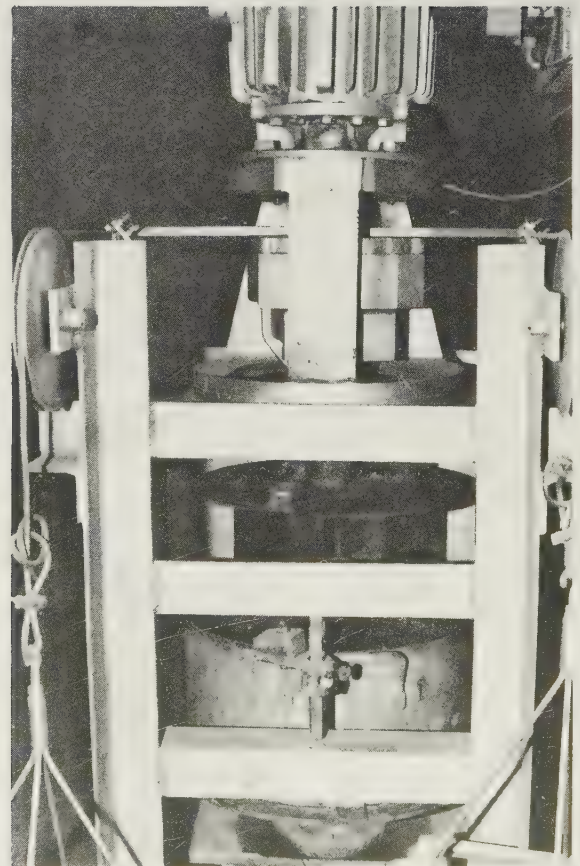
L'abrasif consiste en un mélange de silice, d'eau et d'argile. On le met dans le récipient situé sous le plateau porte-échantillon qui peut être déplacé verticalement par un système de vis et écrou. Le plateau peut tourner dans les deux sens à des vitesses variant de 0 à 450 tr/mn. Ce plateau peut recevoir trois échantillons disposés à 120°, de rayons respectivement égaux à 50, 100, 150 mm, ce qui permet aux échantillons une gamme de vitesse variant de 0 à 25,44 km/h. La durée de l'expérience est de 30 h pour chaque essai. Après la fin de chaque essai, il faut vider le récipient pour enlever les petits fragments provoqués par la cassure des grains et rétablir le poids d'abrasif en rajoutant de la silice de même grosseur et la quantité d'argile et d'eau nécessaire. Ces mesures sont utiles au maintien d'un pouvoir abrasif constant et par conséquent d'un taux d'usure constant.

2)- Machine d'abrasion avec disque de caoutchouc :

Cette machine (fig. 5) est un perfectionnement de l'appareil d'abrasion Brinelle. Elle consiste en un disque tournant en caoutchouc qui, par ses aubes amène l'abrasif sur la périphérie contre un échantillon fixé dans une position verticale. L'emploi de disque en caoutchouc a deux effets : la répartition de l'abrasif sur la surface de l'échantillon et le maintien de la pression à une valeur basse grâce à l'action du coussin de caoutchouc, qui est peut-être semblable à l'action du sol sur la surface des outils de travail du sol. Le manque de forte pression sur la surface de l'échantillon rend cet appareil préférable dans le cas de conditions de travail où la pression reste moyenne même en présence de choc. C'est pourquoi les résultats obtenus avec cet appareil par Mohsenin et Avery concordent parfaitement avec ceux des essais d'usure



**Fig. 4 - Appareil réalisé par Borgheï
pour l'étude d'abrasion sous faible contrainte**



pendant le labourage en terrain sablonneux. Cet appareil permet également d'étudier l'abrasion humide. Mais cette machine est inutilisable pour des essais à forte pression, parce que les grains abrasifs s'incrudent (embeded) dans le caoutchouc.

V.- APPAREILS D'ABRASION PAR AFFOUILLEMENT

Dans ce type de machine, l'abrasif a la forme d'une toile abrasive et l'échantillon frotte sur cette toile avec une pression assez élevée. Cette méthode paraît utilisable pour l'étude des matériaux soumis à une attaque directe des produits minéraux et à peu près conforme au phénomène d'abrasion de la pointe et du tranchant du soc de charrue dans le sol qui ont une intensité d'usure très élevée.

1)- Machine d'usure avec disque abrasif :

Cette machine consiste en un dispositif dans lequel un échantillon à essayer est pressé à son extrémité contre une toile abrasive. Elle a été réalisée par Robin en 1910. Depuis, elle a été employée par de nombreux chercheurs.

Krushchov et Babichev (12), Richardson (27), Mulhearn et Samuels (7) ont construit des machines d'après le même principe (fig. 6). L'échantillon cylindrique d'un diamètre de 2 mm et d'une longueur de 20 à 25 mm glisse sous un poids mort, sur un papier abrasif fixé sur un disque rotatif. Un déplacement radial de l'échantillon donne un chemin en spirale sur la toile, ce qui permet à l'échantillon d'être en contact permanent avec l'abrasif frais, qui garde un pouvoir d'abrasion constant au cours de l'essai.

2)- Machines à pointe et anneau :

Crook (50) a étudié l'usure et la lubrification sur les machines à "pointe et anneau" (fig. 7). Elles se composent d'une pointe fixe de 6 mm de diamètre environ, dont l'extrémité ou le côté est appliqué contre un anneau de 25 mm de diamètre environ qui peut tourner à n'importe quelle vitesse. Le volume de matière enlevé par la pointe est obtenu soit en pesant la matière provenant du sillon, soit en calculant les dimensions de celui-ci.

VI.- MACHINES D'ABRASION SOUS FORTE CONTRAINTE

Ce type de machine d'abrasion est basé sur le principe de frottement par roulement de l'abrasif, de telle façon que l'abrasif soit pris entre deux surfaces métalliques. La particularité de ce type de machine est la création d'une pression très élevée par chaque grain abrasif sur la surface de l'échantillon, et par conséquent une usure très intensive.

1)- Appareil d'abrasion Brinell

Le diagramme de la fig. 8 représente le principe de la machine. L'échantillon A est placé dans un cadre conçu de telle sorte qu'il puisse se déplacer en direction ou en provenance du disque abrasif B. Au cours d'un essai, l'échantillon est appuyé contre le disque abrasif par la pression uniforme d'un poids W.

Fig. 5- Appareil d'abrasion avec disque de caoutchouc

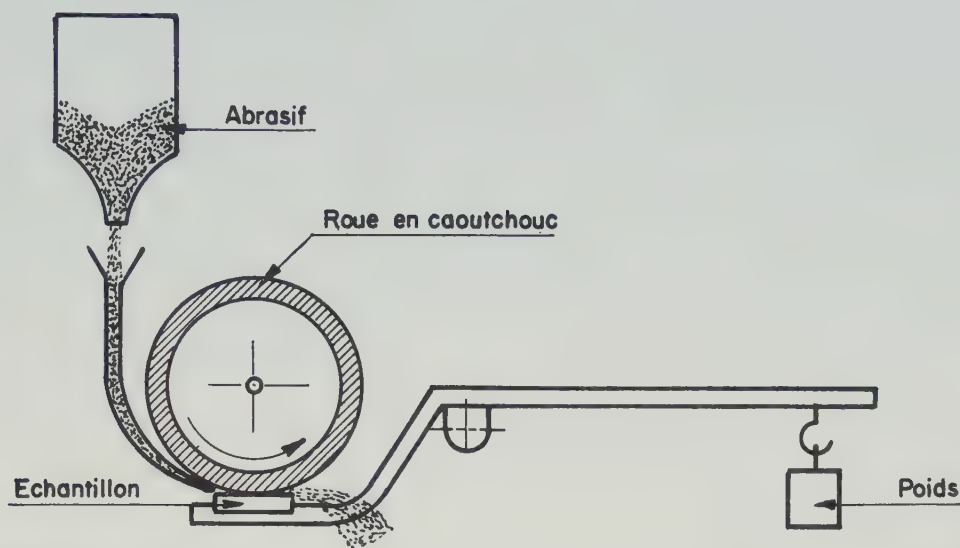


Fig. 6- Principe d'une machine d'abrasion par affouillement

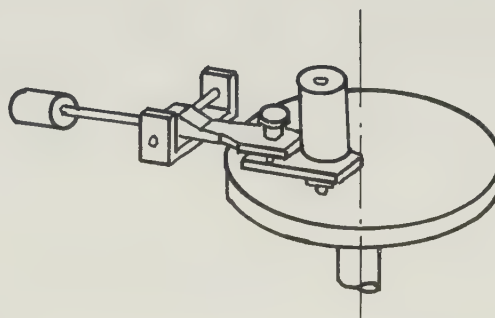


Fig. 7- Principe d'un appareil à pointe et à anneau

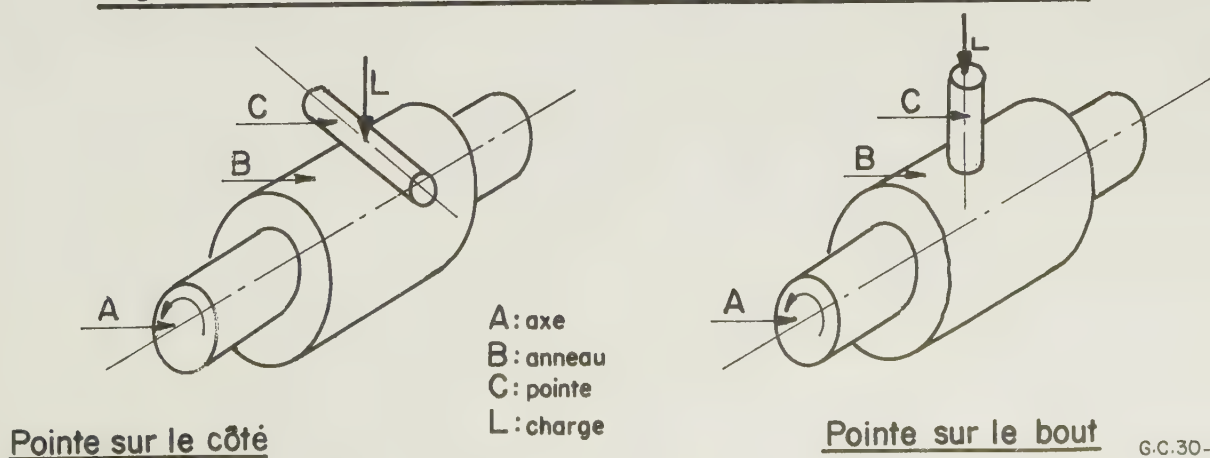


Fig.8- Schéma du principe de l'appareil d'abrasion BRINELL

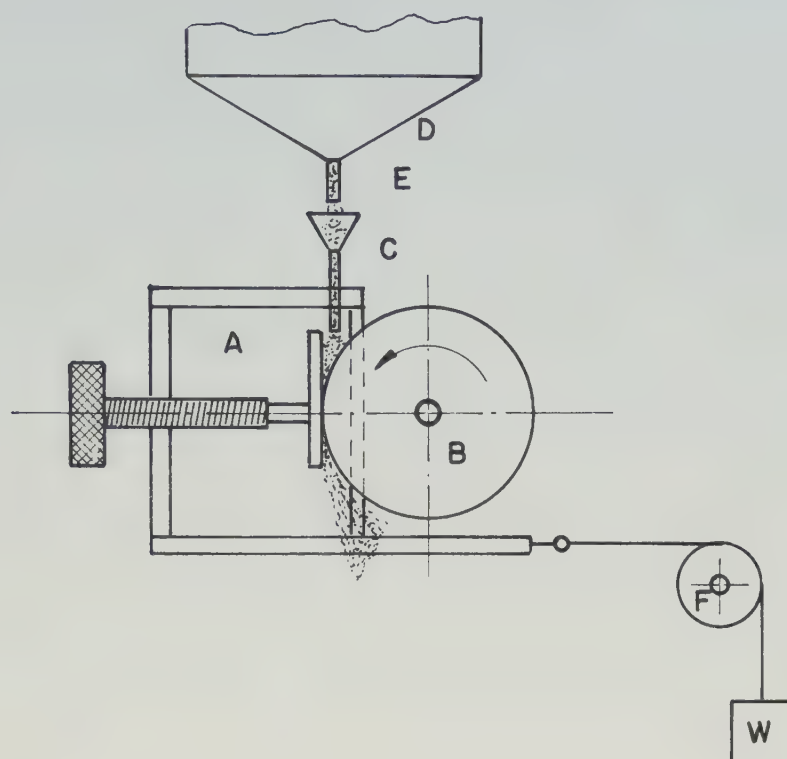
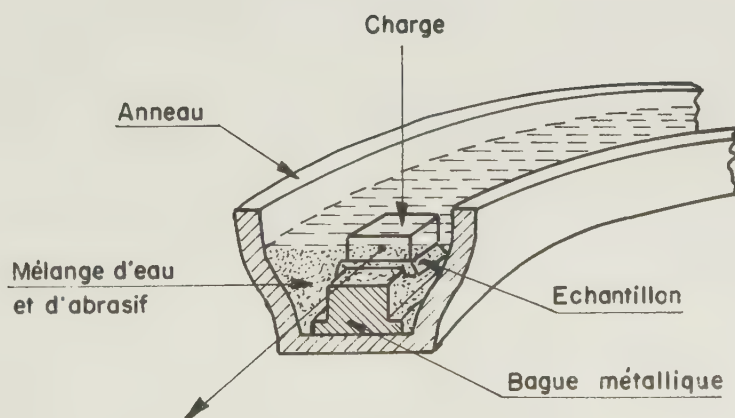


Fig.9- Principe de l'appareil d'abrasion AMSCO



le sable soigneusement criblé passe du semoir D au point C par la valve E, où il est placé entre le disque abrasif et l'échantillon. Le disque abrasif B a 10 cm de diamètre et 5 mm d'épaisseur environ. Il est coupé dans une plaque Armco ou dans une plaque de fer doux relativement uniforme. Il tourne à 45 tr/mn environ. Au cours de l'essai, le disque effectue plusieurs révolutions de telle sorte qu'un point de sa circonférence se déplace dans un secteur choisi. L'échantillon est pesé avant et après la course. La résistance à l'usure relative des échantillons est donnée par leur perte de poids mesurée en grammes au dix millième près. Un aspirateur enlève la poussière produite par l'abrasion.

2)- Appareil d'abrasion AMSCO

Cet appareil (fig. 9) a été réalisé en 1928 par Blake (50) à l'America Manganese Steel Company pour les essais d'abrasion humide et sèche sous forte contrainte. Depuis, il a été utilisé par de nombreux chercheurs et en particulier par H. Avery (4). Il consiste essentiellement en un anneau circulaire rempli d'abrasif (silice et eau) dans lequel l'échantillon à essayer est monté sur un bras horizontal qui tourne autour d'un axe. A l'autre extrémité du bras se trouve un échantillon témoin de même dimension. Les deux échantillons sont pressés par des poids contre une bague circulaire métallique qui se trouve au fond de l'anneau rempli d'abrasif. Les grains de silice passant entre la surface de la bague et l'échantillon se cassent et s'arrondissent graduellement : c'est pourquoi il est nécessaire de changer l'abrasif à la fin de chaque essai. Le rôle de l'eau dans le mélange d'abrasif est d'une part de faciliter l'écoulement de l'abrasif entre les deux surfaces métalliques et d'autre part d'empêcher l'élévation des températures dues au frottement des grains abrasifs avec la surface métallique. Le rôle principal de la bague métallique est de garder l'échantillon et de lui appliquer une pression bien déterminée et constante. Khrushchov (9) a montré que l'usure de l'échantillon dépend du quotient de la dureté de l'échantillon et de la dureté de la bague, et que l'usure sera plus grande si le métal de la bague est plus doux. Le facteur important dans cet appareil est l'action de moulage des grains abrasifs par laquelle de fortes pressions sont transmises à l'échantillon. Ces pressions s'élèvent jusqu'à la force d'écrasement des grains de l'abrasif et dépendent de la grosseur des grains. C'est pourquoi Khrushchov attache une grande importance à la dynamique de la charge appliquée et aux dimensions des grains. Suivant l'utilisation des grains ou de la poussière de silice, il constate l'abrasion sous forte ou faible contrainte.

F.- EXPRESSIONS DES RESULTATS D'ESSAIS D'ABRASION

Les résultats d'essais par abrasion peuvent être donnés sous les formes suivantes :

a) L'usure absolue : cet indice peut-être pris dans les cas où l'on veut démontrer l'effet de quelques facteurs externes sur l'usure de l'échantillon, sans comparaison avec un métal témoin. Elle peut être exprimée en volume ou en poids de la perte de matière.

b) Taux d'usure : l'usure par unité de longueur de course de l'échantillon est appelé "taux d'usure". On peut l'employer pour comparer l'usure de différents matériaux dans les mêmes conditions.

c) Taux d'usure relatif : c'est le rapport entre le taux d'usure de l'échantillon et le taux d'usure de l'échantillon standard. Cette façon d'exprimer l'usure a l'avantage de montrer que l'indice d'usure relative est négligeable et rend possible la comparaison des résultats d'un essai d'usure d'un type donné aux résultats d'un autre type, pourvu que l'usure soit exprimée de la même façon, c'est-à-dire rapportée au même matériau standard.

d) Résistance à l'usure relative : cet indice est l'inverse du taux d'usure relative et peut être employé comme critère valable pour la comparaison de comportement à l'usure des différents matériaux.

e) Taux d'usure spécifique : ce terme est l'usure d'un matériau par unité de chemin parcouru, qui est également rapporté à la surface d'abrasion. Il est employé pour l'étude de l'abrasion des échantillons ayant des formes et des surfaces différentes.

CHAPITRE 2

ABRASION SOUS FAIBLE CONTRAINTE

A - INTRODUCTION

Les organes des machines agricoles qui travaillent le sol (soc, dents,...etc) devraient posséder une bonne résistance à l'usure par abrasion. Comme on l'a déjà signalé, l'étude générale de ces organes ne peut s'effectuer à l'aide d'expériences d'usure par abrasion dans le champ, car elle serait trop longue et trop onéreuse. Il est également difficile d'obtenir des résultats identiques à cause des changements climatiques et des conditions du sol.

Pour éviter ces Inconvénients, nous avons décidé d'effectuer nos études préliminaires d'usure par abrasion avec un appareil conçu par Borghei. Nous avons déterminé ainsi la résistance à l'abrasion de divers métaux susceptibles d'être utilisés dans la fabrication d'outils à travailler le sol, et l'influence de la dureté, du module d'élasticité et de la vitesse sur l'usure des métaux.

B - DESCRIPTION DE LA MACHINE

Organes de la machine.

a) un moteur électrique (6 cv, 220-380 V, 50 périodes, 1500 tr/mn).

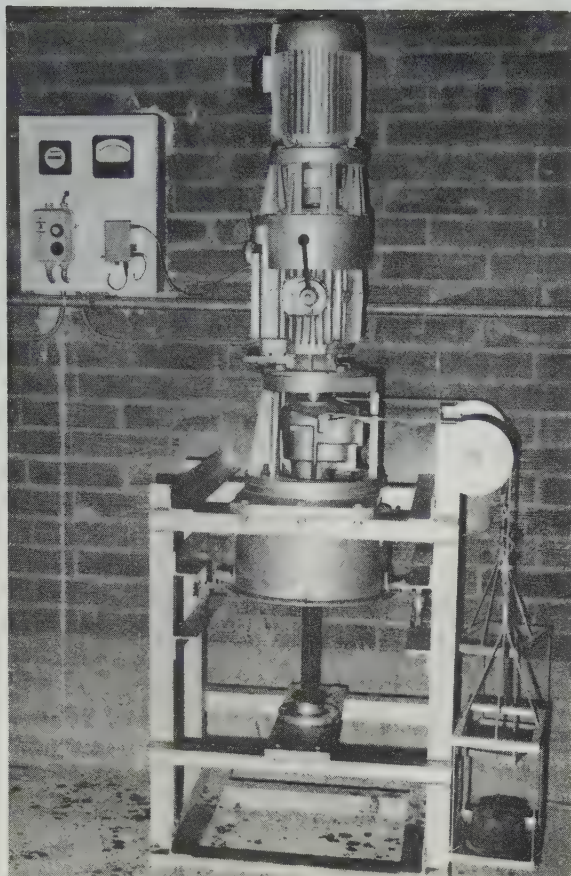
b) Un variateur hydraulique de vitesse, permettant une variation continue de la vitesse entre 0 et 900 tr/mn dans les deux sens de marche avec couple maximum de 5 m/kg.

c) Un tachymètre à impulsions magnétiques monté sur le variateur.

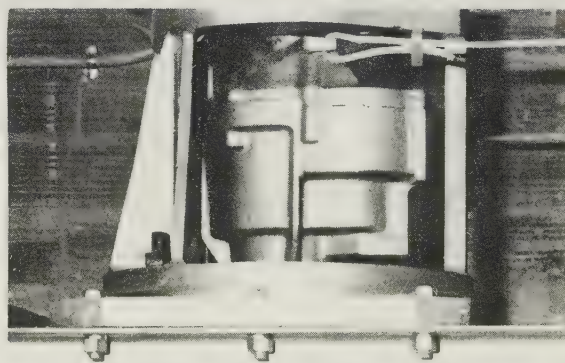
d) Un couplemètre mécanique à engrenages droits spécialement étudié et conçu pour le problème posé. Le moteur, le variateur et le couplemètre sont accouplés et forment un bloc dont l'arbre est vertical ; la sortie est dirigée vers le bas.

e) Un plateau porte-échantillon monté directement sur l'arbre de sortie du couplemètre qui peut tourner dans les deux sens à des vitesses variables et mesurables à tout instant de 0 à 450 tr/mn. Ce plateau peut recevoir trois échantillons disposés à 120°, à des rayons respectivement égaux à 50, 100, 150 mm, ce qui permet pour les échantillons une gamme de vitesse variable de 0 à 25,44 km/h.

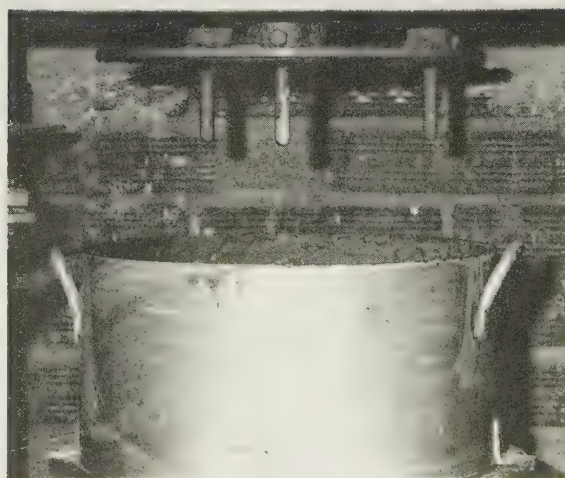
f) Un récipient cylindrique pour abrasif de 390 mm de diamètre et 200 mm de hauteur, qui peut être déplacé verticalement par vis et écrou, de course 290 mm et immobilisé dans sa position de travail par deux pattes de fixation. L'ensemble des divers éléments cités est fixé sur un bâti scellé dans le mur auquel il est adossé. Les figures 10 et 11 représentent une vue de l'ensemble en ordre de marche et une vue à l'arrêt du plateau porte échantillon et du récipient dans sa position basse.



**Fig. 10 - Vue d'ensemble de
l'appareil d'abrasion de Borghei en marche**



**Fig. 11 - Vue du plateau porte-échantillon et
du récipient**



C - EXPERIENCES

Compte tenu des essais de Borghei (19), nous avons adopté les conditions suivantes pour les essais d'abrasion :

I.- ECHANTILLONS

La figure 12 montre l'échantillon cylindrique qui est une réduction simplifiée de l'outil réel, et elle étudie chaque cas. La profondeur de travail dans l'abrasif est de 70 mm. Nous avons utilisé un seul échantillon dans la position médiane pour chaque essai. Le matériau choisi comme acier type pour la détermination de l'influence des divers facteurs sur l'usure est l'acier manganosilicieux 45 S 8 qui est le plus réputé dans la fabrication des outils de travail du sol.

a) Etat de surface

Afin d'éliminer la variation de l'usure due à l'état de surface après le traitement thermique, les échantillons ont été débarrassés de la texture grossière de leur croûte superficielle, qui a une caractéristique totalement différente du point de vue de la résistance à l'usure. D'autre part, dans le but d'obtenir le même état de rugosité (0,25 micron) avant chaque essai, les échantillons ont été polis avec un papier abrasif donné, car la rugosité de la surface est un facteur important dans la résistance à l'usure.

II.- ABRASIF

Il consiste en un mélange de 19 kg de silice en grain de 4,5 - 5,5 mm de 0,750 kg d'argile et de 4,5 kg d'eau. L'abrasif occupe la moitié du volume du récipient, hauteur 100 mm, volume 12 dm³.

Comme au cours de l'essai, les grains de silice s'émoussent par frottement réciproque, ils perdent leur abrasivité au fur et à mesure. L'abrasif devait être renouvelé toutes les 30 heures.

III.- INDICE D'USURE

Après chaque essai de trente heures, nous avons mesuré la perte de poids de chaque échantillon nettoyé et séché. Cette perte de poids a été rapportée à l'unité de chemin parcouru et prise comme indice définissant l'usure d'un échantillon, car il est évident que l'usure est proportionnelle au chemin parcouru.

D - RESULTATS ET CONCLUSIONS

I.- INFLUENCE DE LA VITESSE DES ECHANTILLONS DANS L'ABRASIF SUR L'USURE :

Nous avons effectué une série d'essais d'abrasion avec les échantillons types cylindriques et nous avons étudié la variation de l'usure en fonction de la vitesse jusqu'à 17 km/h environ, pour évaluer la vitesse économique de moindre usure. Les résultats obtenus proviennent de mesures effectuées après 10 heures de travail pour une distance parcourue de 100 km (tableau I).

TABLEAU I :

Usure des échantillons à différentes vitesses.

N°	Vitesse (km/h)	Usure par 100 km (gm)
1	0,94	0,70
2	1,88	0,64
3	2,82	0,61
4	3,77	0,70
5	4,70	0,80
6	5,64	0,98
7	7,54	1,35
8	8,48	1,45
9	9,40	1,78
10	11,31	2,83
11	14,13	4,55
12	16,96	7,60

Fig.13 EFFETS de la VITESSE sur l'USURE
avec l'appareil de laboratoire
à faible contrainte

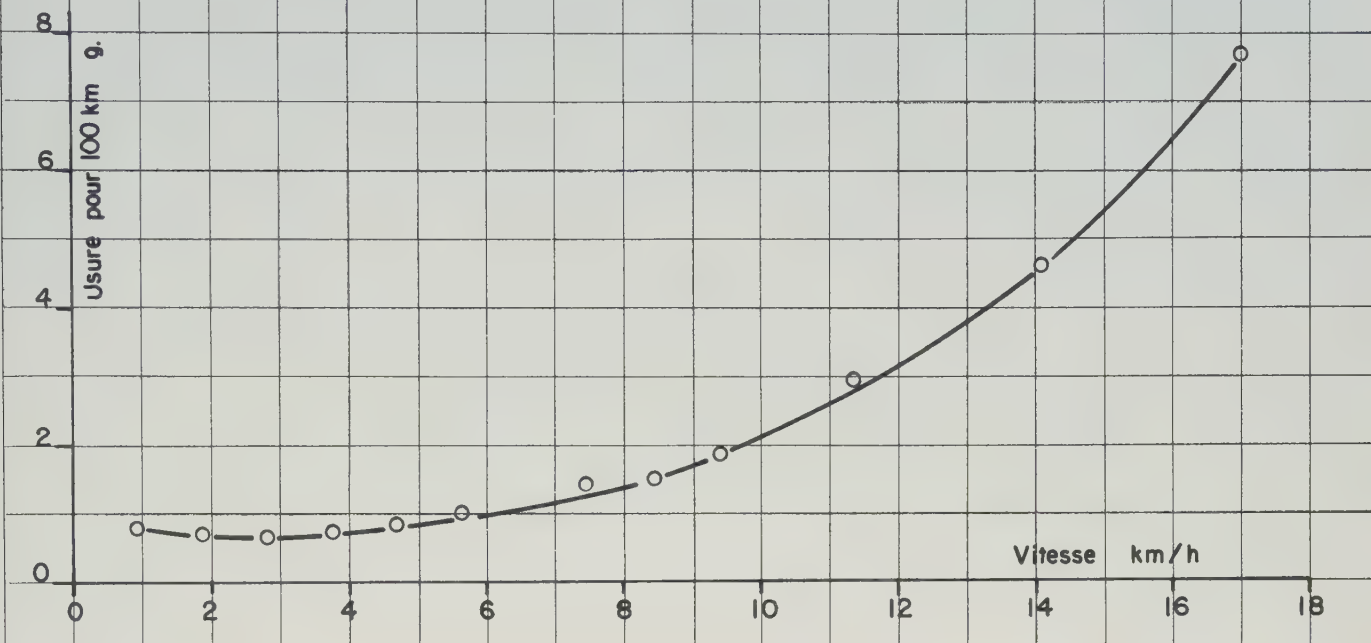
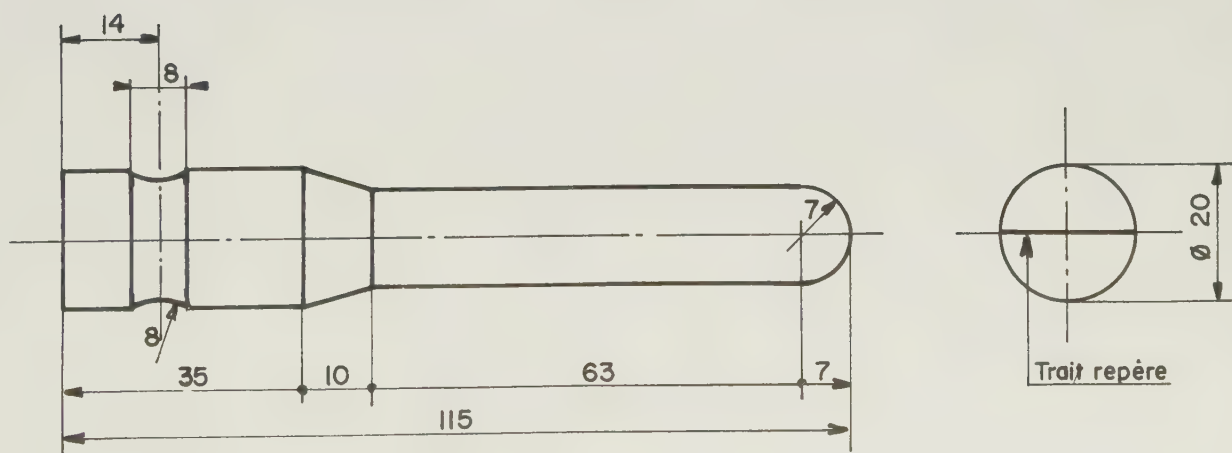


Fig.12 Echantillon cylindrique pour l'abrasion
sous faible contrainte



Mat.: 45 S8

D'après le graphique de la fig. 13, on peut conclure que l'usure varie avec la vitesse de travail. La courbe peut être divisée en trois zones distinctes :

1 - De 1 à 4 km/h : l'usure semble être constante ou diminuer très légèrement.

2 - De 8 à 17 km/h : l'usure augmente rapidement. Elle est proportionnelle au carré de la vitesse. Il est intéressant dans ce cas de noter que l'usure par unité de temps augmente de la même façon que le cube de la vitesse, confirmant ainsi les résultats obtenus par W.A. Staufer (22).

3 - De 4 à 8 km/h : c'est une phase intermédiaire. L'usure augmente d'abord avec la vitesse, mais pas dans les mêmes proportions qu'en "2".

II.- INFLUENCE DE LA DURETE ET DU MODULE D'ELASTICITE SUR LA RESISTANCE A L'ABRASION DES METAUX :

Pour faire une classification des divers métaux utilisés dans la construction des outils du sol, nous avons étudié la résistance à l'usure de ces métaux sur une machine de Borghel (19). Ces expériences ont été faites comme les précédentes.

Quatre fournisseurs ont bien voulu s'intéresser à notre projet et nous procurer les échantillons nécessaires dans 24 nuances différentes, à savoir :

- 5 fontes
- 5 carbures (dont un à deux traitements différents).
- 11 aciers (dont un à trois traitements différents).

Au total nous avons 21 métaux et 24 nuances. Le tableau 2 indique la composition chimique des 21 métaux à essayer. Pour chaque nuance de métal nous disposons de deux échantillons identiques permettant de faire deux essais identiques donc deux mesures et une moyenne.

TABLEAU 3

RESULTATS D'ESSAIS D'ABRASION

Désignation		U_1	d	U_2	$r = \frac{10}{U_2}$	V	E	$m \frac{V^2}{2E}$
Fonte 200 traitée	(S.L.)	0,455	7,3	0,63	16	705	10.000	25,2
Fonte 300 traitée	(S.L.)	0,480	7,3	0,66	15,2	608	10.000	18,4
Stellugine 720	(U)	0,790	7,75	1,02	9,8	655	18.000	12
Acier KOR traité	(U)	0,840	7,75	1,09	9,1	685	21.000	11,2
Stellugine 740 traitée à 870°	(U)	0,910	7,65	1,18	8,5	723	18.000	14,2
Fonte ni-hard IV	(S.L.)	0,890	7,3	1,22	8,2	506	10.000	12,8
Stellugine 728	(U)	1,-	8,-	1,25	8,-	695	18.000	13,5
Fonte ni-hard II	(S.L.)	1,050	7,3	1,43	7	554	10.000	15,5
Stellugine 733 traitée	(U)	1,240	7,7	1,61	6,2	513	18.000	7,4
Stellugine 702 (non recuit)	(U)	1,240	7,7	1,61	6,2	675	18.000	12,7
Fonte FC 2	(S.L.)	1,240	7,3	1,70	5,9	598	10.000	18
Stellugine 702(recuit)	(U)	1,420	7,7	1,84	5,45	655	18.000	12
Acier Saphir traité	(U)	1,500	7,8	1,92	5,25	805	21.000	15,5
Acier KS 10 traité	(U)	1,620	7,8	2,07	4,85	700	21.000	11,7
Acier SAE EX 2 (trempe H.830°-revenu 175°)	(I.N.)	1,710	7,8	2,20	4,55	695	21.000	11,5
Acier UM7 traité (35 CD 4)	(U)	1,900	7,8	2,43	4,10	485	21.000	5,65
Acier Creusabro ML, traité (45 S 8)	(C)	2,800	7,8	3,60	2,78	617	21.000	9,-
Acier Creusabro M traité	(C)	2,900	7,8	3,72	2,68	317	21.000	2,40
Acier Creusabro 32, traité	(C)	3,390	7,8	4,35	2,32	334	21.000	2,65
Acier UM 7 traité	(U)	3,430	7,8	4,40	2,27	343	21.000	2,82
Acier A2 traité (XC 55)	(C)	3,480	7,84	4,43	2,26	325	21.000	2,53
Acier Virgo 130	(C)	3,940	7,75	5,20	1,97	334	21.000	2,65
Acier UM 7 revenu (35 CD 4)	(U)	4,680	7,8	6,05	1,65	236	21.000	1,33
Acier NSU	(U)	5,100	7,8	6,55	1,54	236	21.000	1,33

C - Classement, par ordre décroissant de résistance à l'abrasion

U_1 - Usure mesurée, en g

d - Densité

U_2 - Usure calculée, en dixième de cm^3

$r = \frac{10}{U_2}$ - Résistance à l'abrasion

V - Dureté Vickers

E - Module d'élasticité

$m = \frac{V^2}{2E}$ - Modell factor

Le programme comprend donc 48 essais, pour user 48 échantillons. La durée d'un essai a été fixée à 30 heures. L'échantillon est placé dans la position médiane et se déplace dans l'abrasif à la vitesse de 200 tr/mn soit 7,5 km/h. L'usure est la différence entre la masse initiale et la masse finale de l'échantillon.

Instruits des résultats de Borghei (19) sur l'influence de l'état de surface sur l'usure, nous avons pris la précaution de polir chaque échantillon, avant essai, en vue de réduire la rugosité à 0,25 micron. Après polissage, nous avons mesuré la dureté Vickers de chaque échantillon. La densité et la module d'élasticité ont été indiqués par les fournisseurs même pour calculer l'usure en volume et le "*Modell factor*".

Les résultats des essais sont inscrits au tableau 3.

Tous les métaux sont classés d'après leur résistance à l'usure par abrasion. Nous avons étudié graphiquement (fig. 14) la résistance à l'usure par abrasion, la dureté Vickers V et le "*Modell factor*", m de chaque catégorie de métal.

Après comparaison des résultats, on peut assurer que pour tous les métaux, il n'existe pas de relation, particulièrement de relation de proportionnalité, d'une part entre la résistance à l'usure et la dureté, d'autre part entre la résistance à l'usure et le "*Modell factor*", contrairement à l'affirmation de plusieurs chercheurs. On peut constater pourtant qu'en général la résistance à l'usure des métaux varie dans le même sens que leur dureté et leur module d'élasticité, malgré certaines anomalies.

Les métaux de forte teneur en carbone ont une grande résistance à l'usure. On peut constater par exemple grâce aux tableaux 2 et 3, que la fonte 200 et l'acier KS 10 ont approximativement la même dureté. Mais leur teneur en carbone est respectivement de 2,65% et 1%, et leur résistance à l'usure 16 et 4,85. D'autres alliages n'ont au contraire que peu d'action ou même une action défavorable sur l'usure par abrasion. Les stellugines 720 et 702 par exemple, ont la même teneur en carbone (4% et 3,8%) alors que celle du chrome est 16%. Seule la teneur en nickel de ces métaux varie (2% et 7%). La résistance à l'abrasion sera respectivement 9,8 et 6,2. Les aciers saphir et le Creusabro M ont aussi la même teneur en carbone (1,10 et 1,15%). Le premier ne contient pas d'alliage alors que le second renferme une grande quantité de manganèse (12,35%) et un peu de silicium (0,38%). Leur résistance à l'abrasion est respectivement 5,25 et 2,68.

De plus, souvent, les échantillons qui nous ont été soumis, avaient été traités thermiquement (notamment par trempe et revenu) par les fournisseurs. Dans ces deux cas, nous pouvons apprécier l'influence du traitement :

Métaux	Traitement	Dureté V	Résistance à l'abrasion r
1 Stellugine 702	non recuit	675	6,20
2 Stellugine 702	recuit	655	5,45
1 Acier UM 7	Traitement 1	485	4,10
2 Acier UM 7	Traitement 2	343	2,27
3 Acier UM 7	Traitement 3	236	1,65

Fig. 14 - RESISTANCE à l'USURE par
ABRASION de différents METAUX
selon leur DURETÉ et leur "Modell Factor"

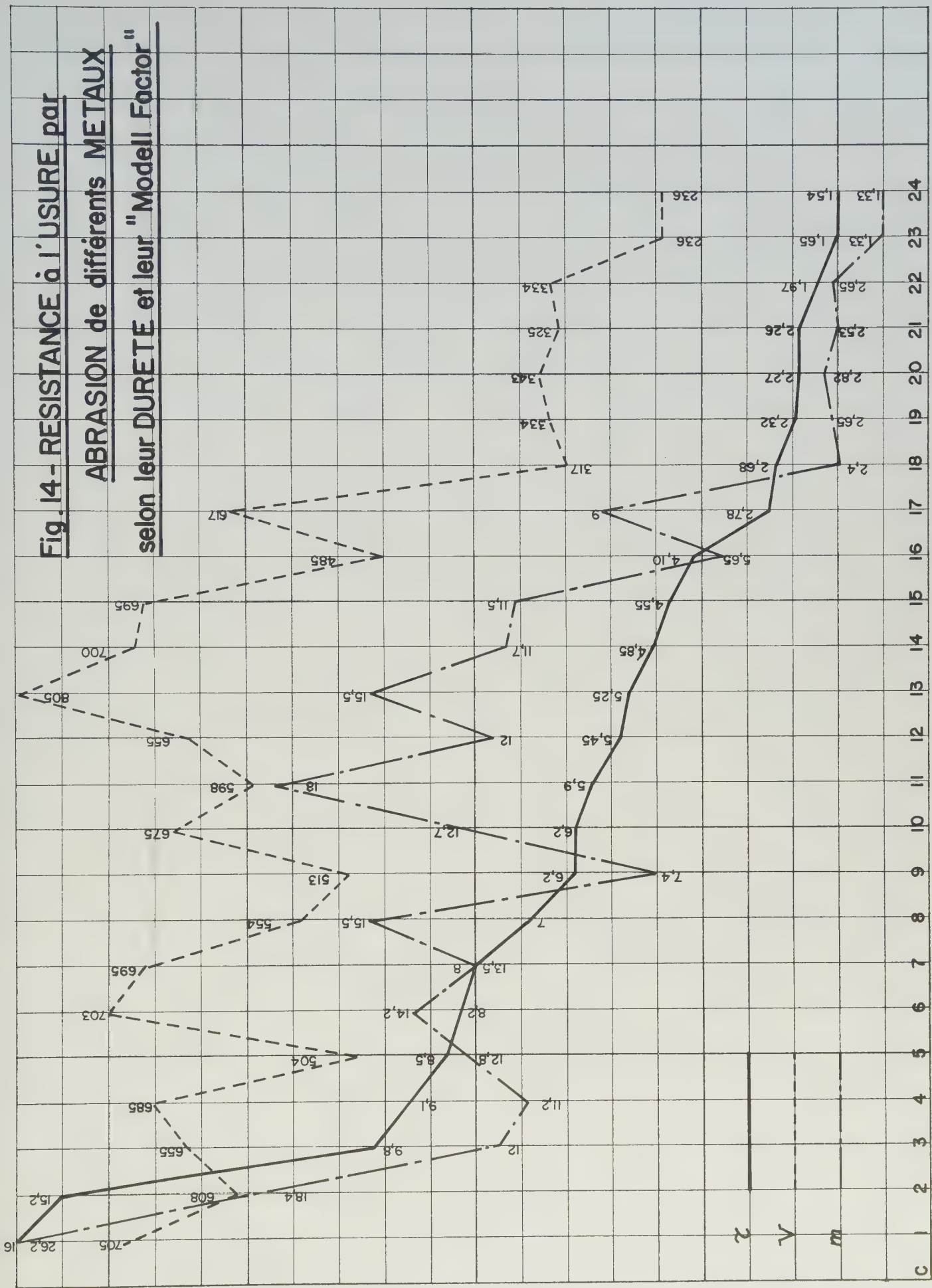
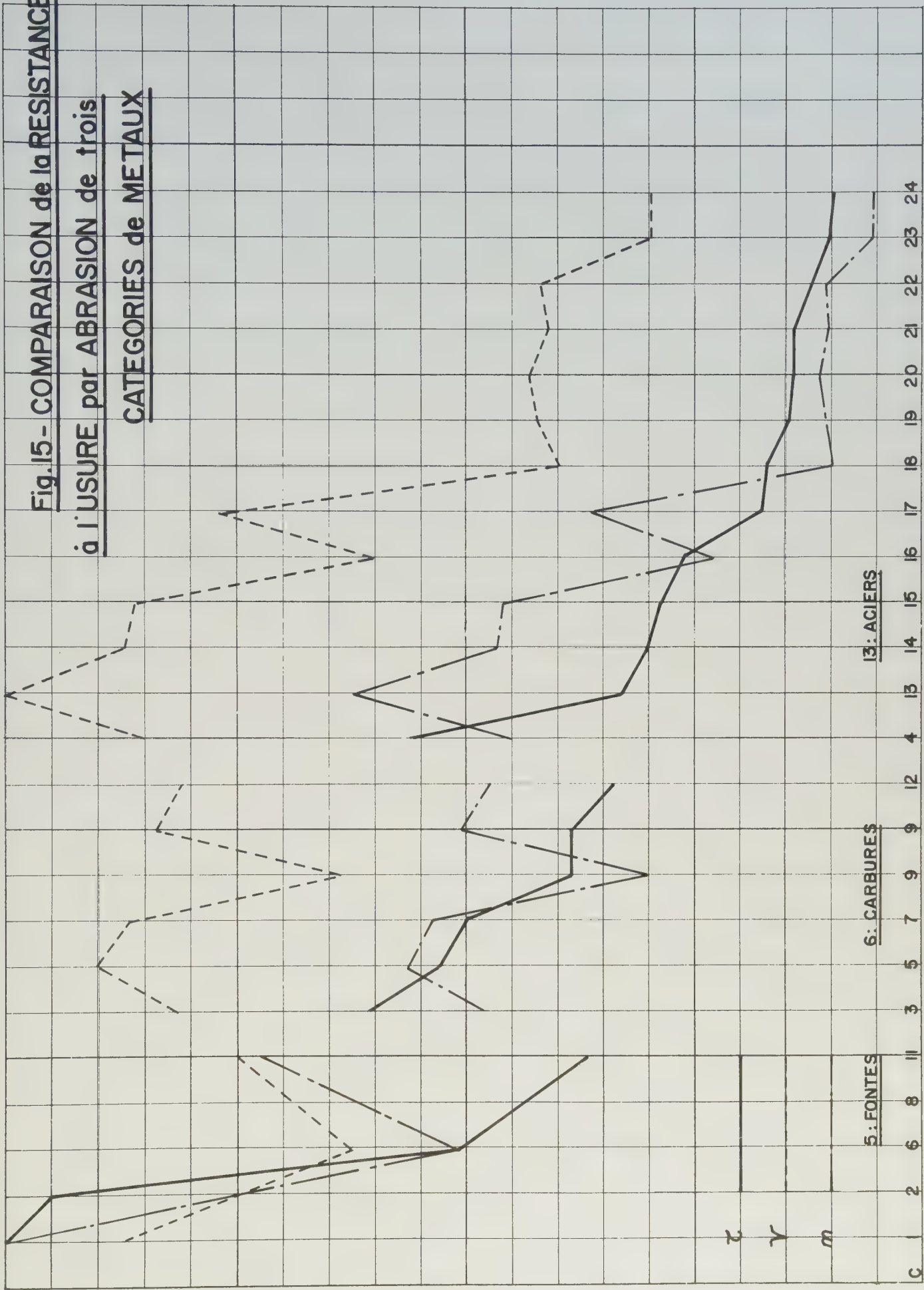


Fig.15 - COMPARAISON de la RESISTANCE
à l'USURE par ABRASION de trois
CATEGORIES de METAUX



La fig. 15 montre aussi que d'une manière générale les fontes ont mieux résisté que les carbures qui ont eux-mêmes mieux résisté que les aciers.

Nous pouvons enfin conclure que la résistance à l'usure d'un même métal augmente avec sa dureté et le module d'élasticité. Cependant pour comparer la résistance à l'usure de différents matériaux, il est nécessaire de connaître la microstructure des métaux et leur teneur en carbone.

CHAPITRE 3

ABRASION SOUS FORTE CONTRAINTE

A.- INTRODUCTION

Richardson (46) au cours de ses expériences effectuées dans les champs avec quelques outils agricoles, a démontré que, pour une large série de matériaux et de conditions du sol, les taux d'usure relative concordent en général avec les résultats qu'il a déjà obtenus (ainsi que Khrushov et Babichev 12) au cours d'une étude du mécanisme d'usure résultant d'un contact par glissement sur une toile ou papier abrasif. Mais la plus grande partie de leur travail se rapportait à l'effet des propriétés physiques des métaux et des abrasifs sur la résistance relative à l'usure de différents métaux. Au cours de notre travail, nous avons essayé d'étudier l'usure d'un matériau standard à différentes vitesses de glissement et à différentes charges spécifiques et d'en comparer les résultats avec ceux obtenus dans le champ et pour une abrasion assez faible. Pour cela, il a fallu construire une machine spéciale.

B.- LA MACHINE

Le plan de la machine est basé sur les principes de la machine N.I.A.E. à essayer l'usure, utilisée par Richardson (27). Le Centre d'Etudes et d'Expérimentation de Machinisme Agricole d'Antony en a assuré l'exécution. Les figures 16 et 17 montrent le mécanisme de la machine qui est montée sur un cadre d'acier. Elle comprend :

- 1) Un moteur électrique de 1,5 kW, 220-350 volts, 50 cycles, 1000 tr.mn.
- 2) Un variateur hydraulique de vitesse, donnant une variation continue de la vitesse entre 0 et 560 t/mn dans les deux sens de la marche.
- 3) Deux réducteurs de vitesse, un horizontal et un vertical, ayant un pouvoir de réduction de 1/17,8 et un couple maximum de 10 mkg.

Un disque métallique est fixé à l'arbre du réducteur horizontal au-dessus de la surface plate à laquelle est fixé un disque de feutre. Une toile abrasive, maintenue à l'aide d'un écrou rond femelle de serrage, est posée dessus. L'échantillon cylindrique est fixé à une extrémité du bras par une vis ailée. A l'autre extrémité, on attache un poids mort qui doit contrebalancer le poids du bras et de l'échantillon, pour la charge sur l'échantillon soit nulle. Le bras est fixé à l'arbre du réducteur vertical par un écrou à tête moletée pour pouvoir le remettre facilement dans sa position initiale. Après chaque passage dans les disques métalliques, de poids connu, on ajoute un poids au bout de l'échantillon afin de déterminer aussi la charge spécifique sur l'échantillon au cours d'une expérience.

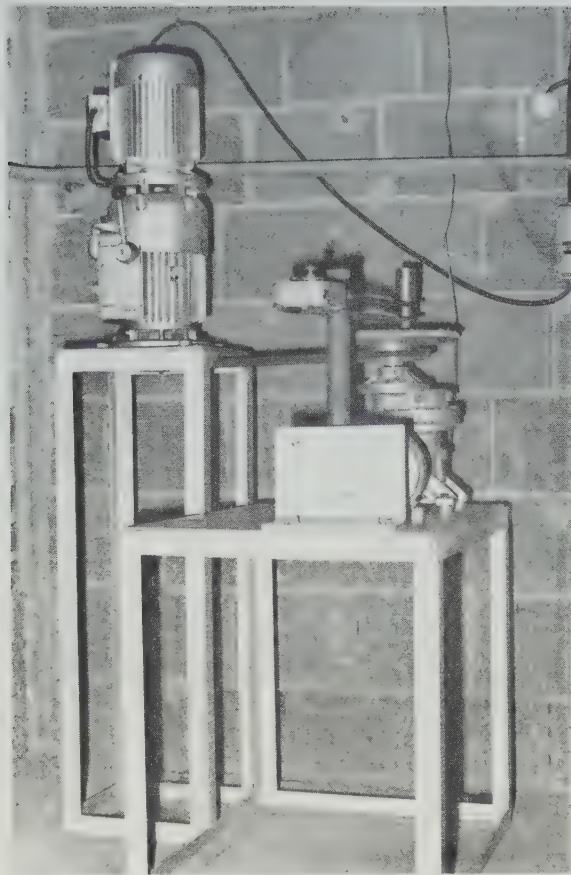


Fig. 16 - Vue d'ensemble de la machine d'abrasion sous forte contrainte (réalisée au CNEEMA)

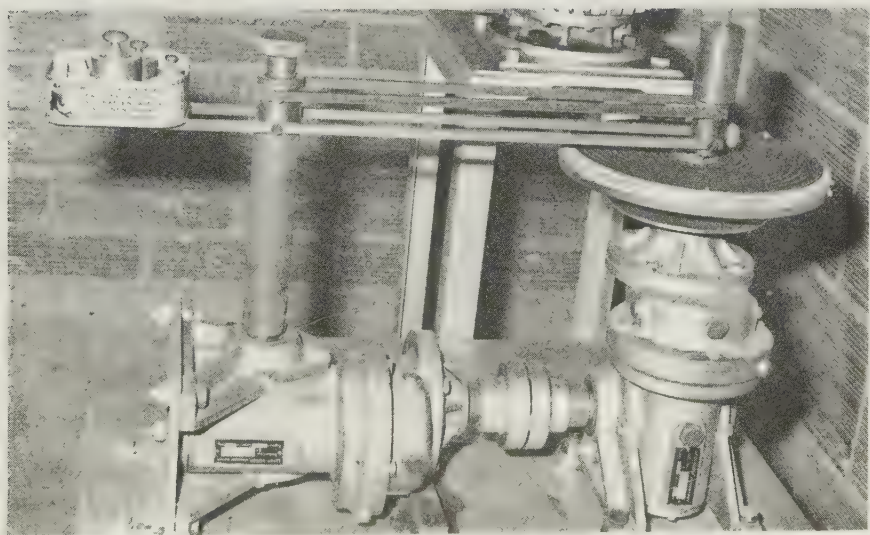


Fig. 17 - Vue montrant le disque abrasif et l'échantillon

Le disque est animé par le moteur par l'intermédiaire d'une courroie et d'une poulie. L'échantillon, au cours de la rotation du disque, subit un déplacement radial de 7,5 mm par tour.

Le diamètre du disque abrasif est 230 mm. L'échantillon peut être essayé sur la surface du disque sur un diamètre maximum de 230 mm et un rayon minimum de 47 mm. La direction du déplacement de l'échantillon par rapport au disque est radiale. Le parcours de l'échantillon sur le disque est donc une spirale d'Archimède, (fig. 18) de longueur 505 mm.

C.- ESSAIS ET RESULTATS

I.- ECHANTILLONS

On donne aux échantillons une forme cylindrique de diamètre 2 mm et de longueur 40 mm, comme le montre la figure (19). Le matériau choisi pour nos essais est le même que celui qui a été décrit au chapitre précédent soit l'acier 45 S 8 traité à chaud. Cet acier a été chauffé à 900°C et refroidi dans l'eau à 450°C. La dureté Vickers mesurée après traitement à chaud est 550 kg/mm² environ.

L'échantillon qui a été uniformisé pendant l'usinage, et dont l'extrémité bien lisse est perpendiculaire à l'axe, est poli pour que les débris et la couche superficielle résultant du traitement à chaud, soient éliminés. Il est lavé dans du trichloréthylène, qui enlève toutes les particules de poussière présentes, et séché avant d'être pesé. La figure 20 montre l'extrémité de l'échantillon soumise à l'usure après l'essai.

II.- ABRASIF

Nous avons choisi pour nos expériences un disque abrasif en corindon qui se vend dans le commerce, fabriqué par la "*Française métallurgique*", et qui présente 10 tailles de grains. La dureté de l'abrasif, que l'on suppose nettement supérieure à celle du matériau à essayer, est d'environ 2200 kg/mm².

Il faut mentionner que les plaques de tissu ou de papier corindon de même taille peuvent présenter des propriétés abrasives fort diverses. Ces différences peuvent être provoquées par les facteurs suivants :

- variation de la composition granulaire et minérale des poudres abrasives déposées à la surface.
- méthode de collage.
- propriétés du matériau sur lequel les poudres sont déposées.

Cependant, on verra plus tard, qu'au cours de nos expériences, les résultats obtenus présentent une limite d'erreur moyenne tout à fait acceptable.

Des résultats peuvent varier pour les matériaux lorsque les grains sont colmatés, émoussés ou cassés. Pour éviter ces inconvénients nous avons donné une alimentation latérale, si bien que l'échantillon est toujours en contact avec des abrasifs frais.

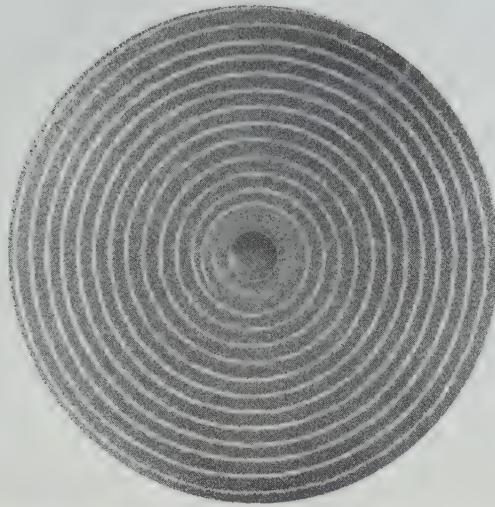


Fig. 18 - Spirale tracée par l'échantillon
sur le disque abrasif

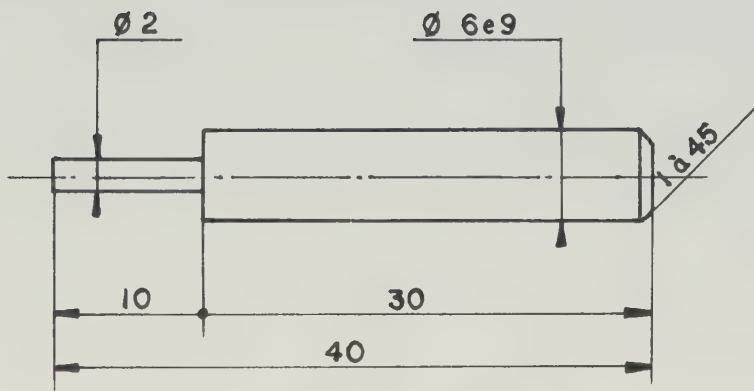


Fig. 19 - Echantillon cylindrique
pour des essais d'abrasion sous forte contrainte

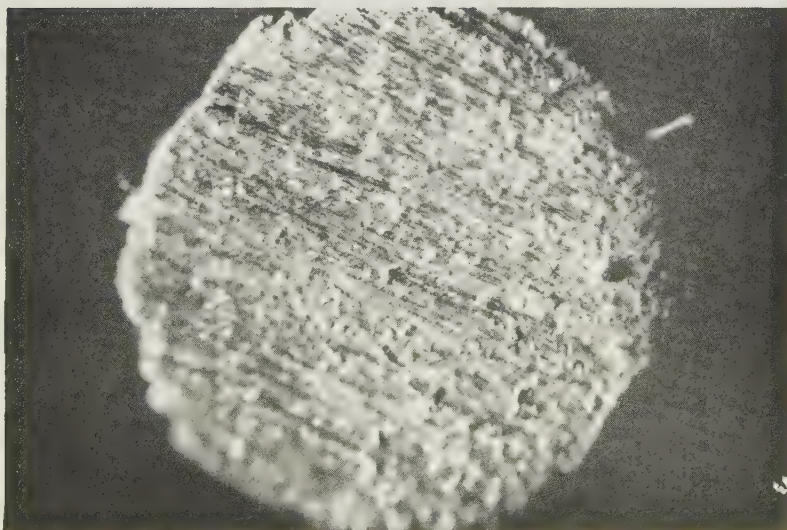


Fig. 20 - Vue de l'extrémité de l'échantillon
après l'essai d'usure

TABLEAU 4

RESULTATS DES ESSAIS DE REPRODUCTIBILITE

N°	X	x	x ²
1	1,84	+ 0,07	0,0049
2	1,66	- 0,11	0,0121
3	1,86	+ 0,09	0,0081
4	1,81	+ 0,04	0,0016
5	1,68	- 0,09	0,0081
6	1,73	- 0,04	0,0016
7	1,83	+ 0,06	0,0036
8	1,66	- 0,11	0,0121
9	1,66	- 0,11	0,0121
10	1,87	+ 0,10	0,0100
11	1,86	+ 0,09	0,0081
12	1,79	+ 0,02	0,0004
13	1,71	- 0,06	0,0036
14	1,85	+ 0,08	0,0064
15	1,87	+ 0,10	0,0100
16	1,76	- 0,01	0,0001
17	1,69	- 0,08	0,0064
18	1,80	+ 0,03	0,0009
19	1,77	0,00	0,0000
20	1,77	0,00	0,0000
35,47			0,1101

Moyenne arithmétique (M) $\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{35,47}{20} = 1.7735$

Ecart (x) = X - M

Ecart-type () = $\sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}} = 0,0768$

Coefficient de variation (V) = $\frac{M}{M} \times 100 = 4,36\%$

Marge d'erreur (E) = $\frac{2}{\sqrt{N}} \times 100 = 1,72\%$

III.- REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS

Pour déterminer la validité de nos essais à l'aide de cette machine, nous avons effectué 20 essais de reproductibilité. Les conditions de l'essai ont été les mêmes dans la mesure du possible. On a adopté pour ces mesures une vitesse de rotation du disque de 50 tours/minute et une charge de 4 kg/cm².

Au cours des essais, la vitesse varie constamment avec le rayon. Pour simplifier les calculs, nous avons pris la vitesse moyenne. L'échantillon a été pesé sur une balance de sensibilité 0,01 mg. L'évaluation de l'usure pendant ces expériences est la moyenne de deux déterminations avec un disque différent pour chaque détermination. On l'obtient en pesant les échantillons avant et après les essais.

Nous avons adopté la méthode de pesage pour mesurer l'usure, car ce procédé est plus rapide que la mesure de la longueur de l'échantillon par micromètre et il n'affecte pas nos résultats.

On peut conclure, d'après les résultats portés au tableau 4 que nos observations ne présentent pas trop de différence.

Les taux d'erreurs de 1,72% pour la moyenne et de 4,36% pour le coefficient de variation, sont tout à fait acceptables.

IV.- EFFET DE LA VITESSE DE GLISSEMENT SUR L'INTENSITE DE L'USURE

Les expériences décrites ci-dessous ont été effectuées en vue de déterminer l'effet de la vitesse de glissement et de la charge sur l'usure de l'acier 45 S 8 après traitement thermique (H = 550 kg/mm²). Les résultats sont portés au tableau 5.

On pourrait s'attendre à des changements provoqués par le taux de tension et par l'échauffement dû au frottement, lorsque la vitesse de glissement augmente. Mais le tableau précédent et la figure 21 montrent que l'augmentation de l'usure est très faible par rapport à la vitesse de glissement.

Fig.21 EFFETS de la VITESSE sur l'USURE
à différentes CHARGES
sur le PAPIER ABRASIF

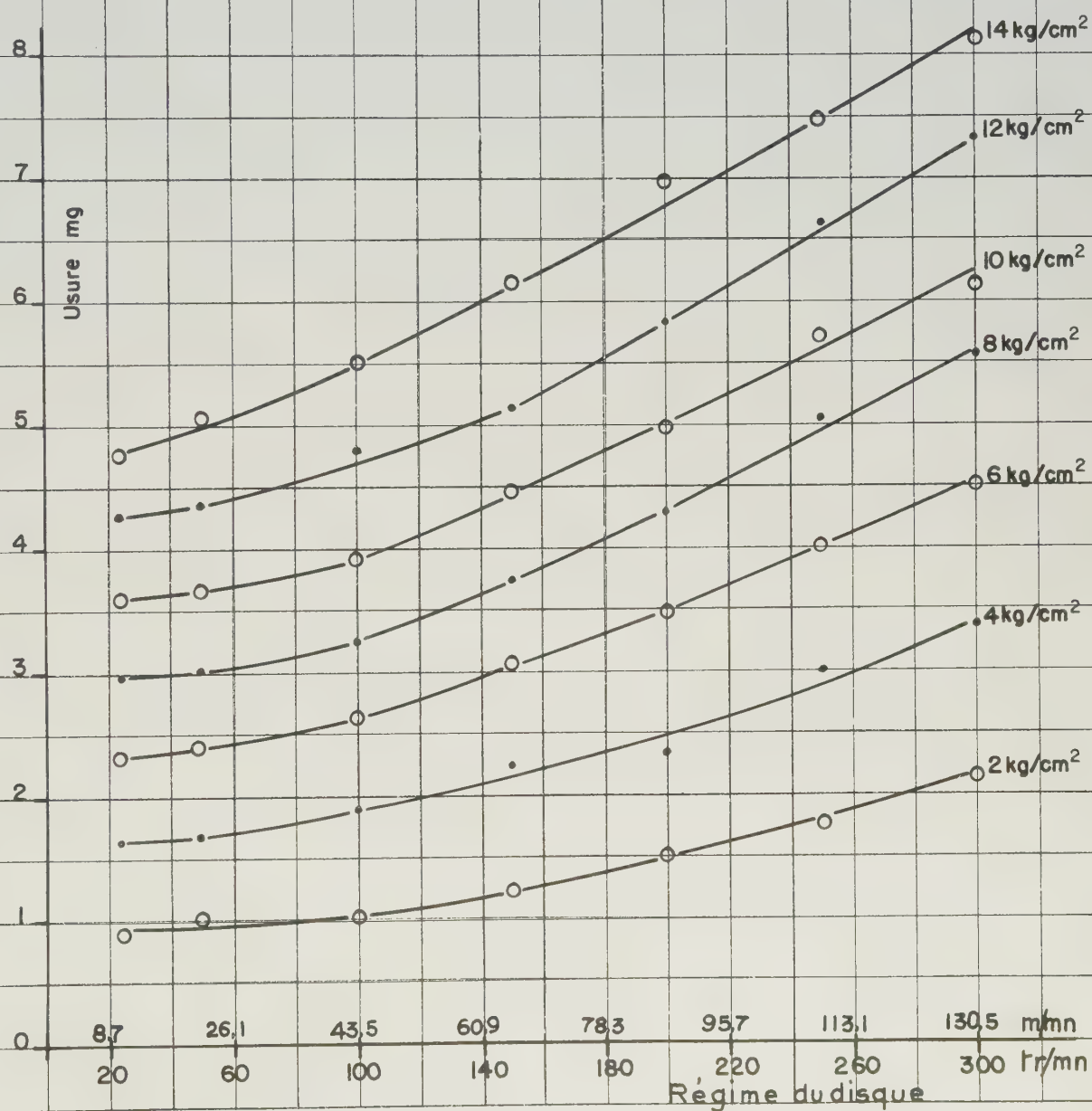


TABLEAU 5

USURE EN mg D'ACIER 45 S 8 SUR DES
VITESSES ET CHARGES DIFFERENTES

Charge (kg/cm ²) vitesse (p.m.)	2	4	6	8	10	12	14
25	0,89	1,66	2,31	2,99	3,62	4,29	4,79
50	1,02	1,70	2,39	3,04	3,70	4,37	5,09
100	1,05	1,92	2,64	3,27	3,94	4,81	5,55
150	1,25	2,27	3,09	3,80	4,48	5,15	6,18
200	1,53	2,35	3,47	4,31	4,99	5,85	6,97
250	1,79	3,03	4,02	5,08	5,71	6,63	7,45
300	2,13	3,39	4,51	5,55	6,13	7,32	8,12

On peut donc en conclure que :

1) L'intensité de l'usure pour une même course ne présente aucun changement à des vitesses et des charges faibles.

2) A des vitesses faibles, l'intensité de l'usure augmente avec la vitesse si la charge est plus forte.

3) L'augmentation de la quantité d'usure est plus importante si les vitesses et la charge sont plus élevées.

4) La vitesse critique à laquelle l'usure commence à augmenter, diminue quand la charge augmente.

On peut conclure qu'en général, la quantité d'usure ne change pas avec les vitesses de glissement les plus faibles. Les variations de l'usure à des vitesses plus élevées peuvent être provoquées par une élévation de température due au frottement. Lorsque la vitesse passe de 10 m/mn (25 tr/mn) à 130 m/mn (300 tr/mn)

L'intensité de l'usure double à peine. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Khrushov et Babichev (12) qui ont trouvé que l'usure était indépendante de la vitesse quand cette dernière est comprise entre 9 et 68 cm/s, valeur qu'ils ont adoptée pour leurs essais classiques. Mêmes après avoir fait passer la vitesse de 2,3 à 274 cm/s pour essayer un métal dur et un métal doux, l'intensité n'augmentait que de 13% ou moins. Dans le cas présent, l'augmentation de l'intensité de l'usure à des vitesses élevées peut être provoquée par la grosseur des particules abrasives qui élèvent plus la température que les fines. Nathan et Jones (20) ont aussi trouvé une augmentation de l'usure provoquée par l'augmentation de la vitesse et ils l'ont aussi attribué à la température de friction.

V.- EFFET DE LA CHARGE SUR L'INTENSITE DE L'USURE

La plupart des chercheurs ont trouvé une relation linéaire entre la pression appliquée à l'échantillon et son usure. Pour vérifier directement ces conclusions, nous avons essayé de l'acier 45 S 8 traité à chaud sur un tissu de corindon dont la taille de grains est 80, sous une pression comprise entre 2 kg/cm² et 14 kg/cm² et, à des vitesses de glissement différentes.

Les résultats obtenus sont portés au tableau 5 et à la figure 22. Cette figure montre que l'usure augmente linéairement avec la charge spécifique. Elle montre aussi l'effet de la vitesse, soit que l'augmentation de l'usure à des charges élevées est plus importante si la vitesse est plus grande. Mais lorsque la charge augmente, le taux d'usure par unité de pression diminue. A 25 tr/mn, quand la charge passe de 2 kg/cm² à 14 kg/cm², la diminution est de 32% environ, mais à 300 tr/mn, elle est de 51% environ. Cette diminution peut être produite par l'augmentation de la profondeur de pénétration avec la charge jusqu'à endommager la résine qui colle les particules au disque. Les particules abrasives seraient donc détachées au cours de l'abrasion de l'échantillon.

Richardson (27) n'a trouvé que 8% de diminution pour la perte de poids par gramme de charge. Ces résultats proviennent surtout de la taille plus petite des grains abrasifs.

Nos résultats sont comparables à ceux de Nathan et Jones (20). Ils ont toutefois utilisé des échantillons plus grands et ont trouvé que la proportionnalité se vérifiait mieux sur les abrasifs plus grossiers.

Khrushov et Babichev (12), au cours de leurs essais d'usure par abrasion de l'antifriction à basse teneur de tin sur un tissu de corindon, ont trouvé que l'intensité de l'usure dans certaines limites de variation de la charge spécifique est directement proportionnelle à la valeur de la charge spécifique.

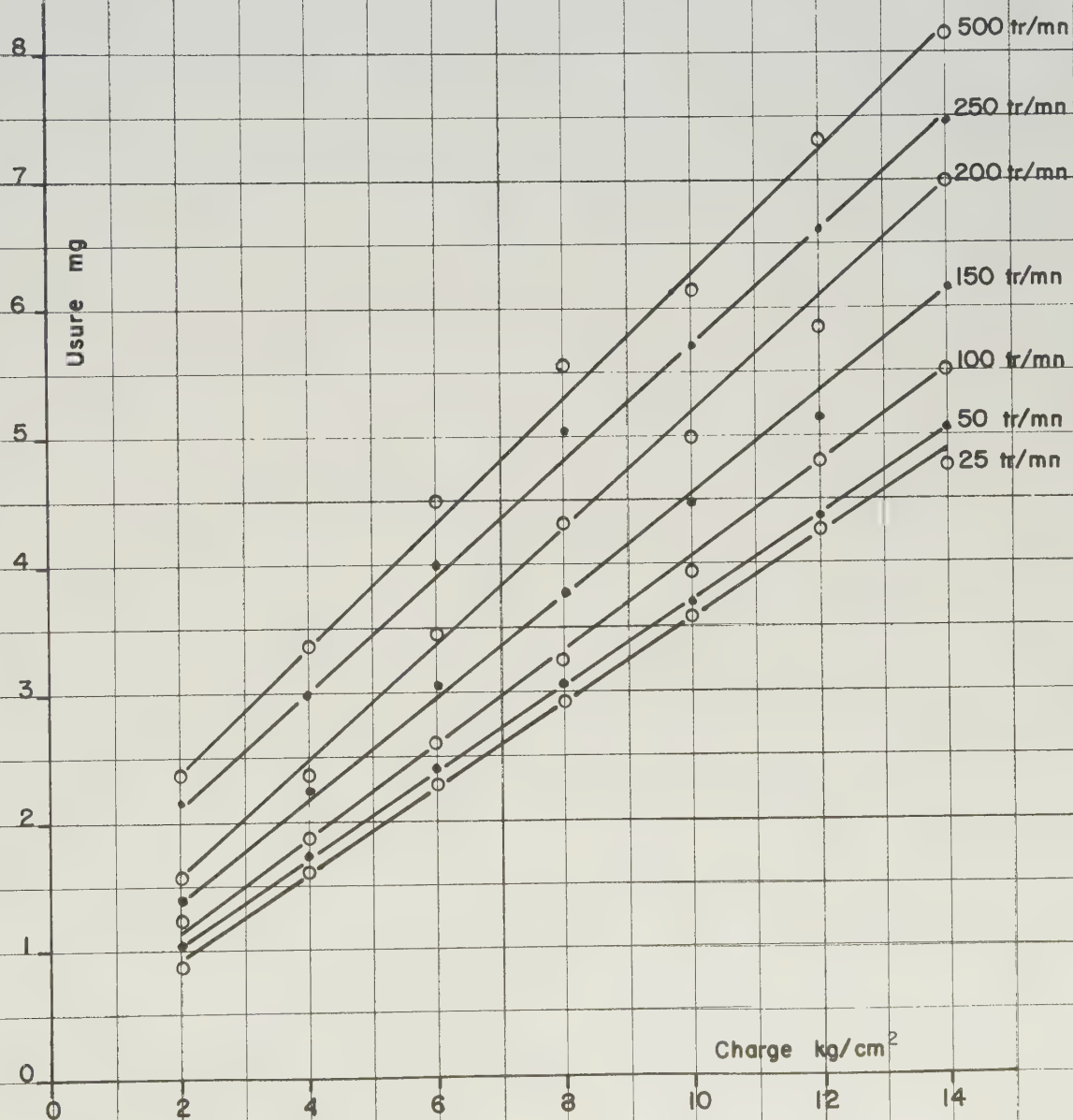
La relation suivante a été établie :

$$V = cP \quad (1)$$

V = volume d'usure

c = constante

Fig.22 EFFETS de la CHARGE sur l'USURE
à différentes VITESSES
sur le PAPIER ABRASIF



Pour notre étude, cette relation peut s'écrire de la façon suivante :

$$V = a + cP \quad (2)$$

a et c étant des constantes qui dépendent de la vitesse de glissement.

Il n'y a pas beaucoup de différence entre les deux équations, car l'effet de la vitesse, comme on l'a déjà vu, est négligeable par rapport à l'intensité totale de l'usure. Et même alors, ces faibles différences peuvent être attribuées à une variation des abrasifs.

CHAPITRE 4

ABRASION DANS LE CHAMP

A.- INTRODUCTION

Chacun sait que les phénomènes d'usure varient beaucoup suivant les conditions du moment. Le taux d'usure des parties de machines sur des solides tels que des minerais, des particules du sol, des minéraux, etc..., dépend de plusieurs facteurs, entre autres des propriétés du métal et du matériau abrasif, de la nature et de la vitesse du déplacement relatif, des conditions de charge, de l'humidité et de bien d'autres.

L'expérience au laboratoire ne donne pas de renseignements suffisants pour permettre de déterminer l'effet de la vitesse et de la charge sur le taux d'usure des parties de machines, à cause des conditions abrasives diverses du sol. Ces dissemblances sont provoquées par les causes suivantes (46) :

- 1 - La présence d'humidité et une dissolution du sol
- 2 - L'abrasif est assez libre et les particules peuvent rouler ou glisser
- 3 - Certaines conditions peuvent provoquer un échauffement par frottement
- 4 - La vitesse tangentielle peut varier dans une large mesure
- 5 - L'intensité d'usure locale et la pression de contact peuvent varier notablement et présentent en général des changements sensibles avec le temps.
- 6 - La taille de la particule est très diverse
- 7 - La dureté de l'abrasif est variable et complexe et peut dépendre de la pression de contact
- 8 - La charge et le mouvement des particules du sol peuvent dépendre du frottement sur la surface d'usure.

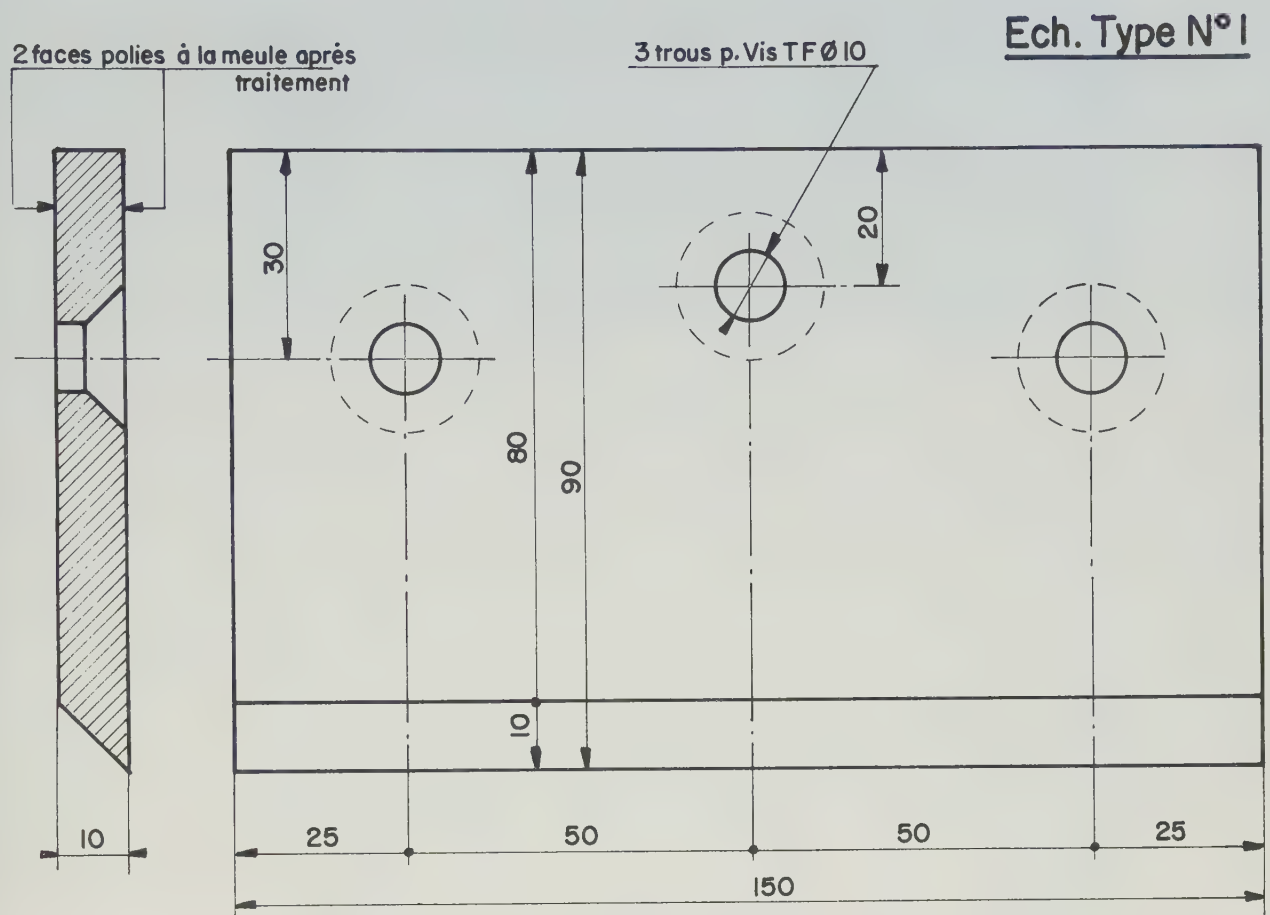
Les expériences décrites dans ce chapitre ont été faites pour déterminer la nature exacte de l'effet de la vitesse et de la charge sur l'usure des bords coupants des outils en acier 45 S 8 dans le sol.

B.- METHODE D'ESSAI

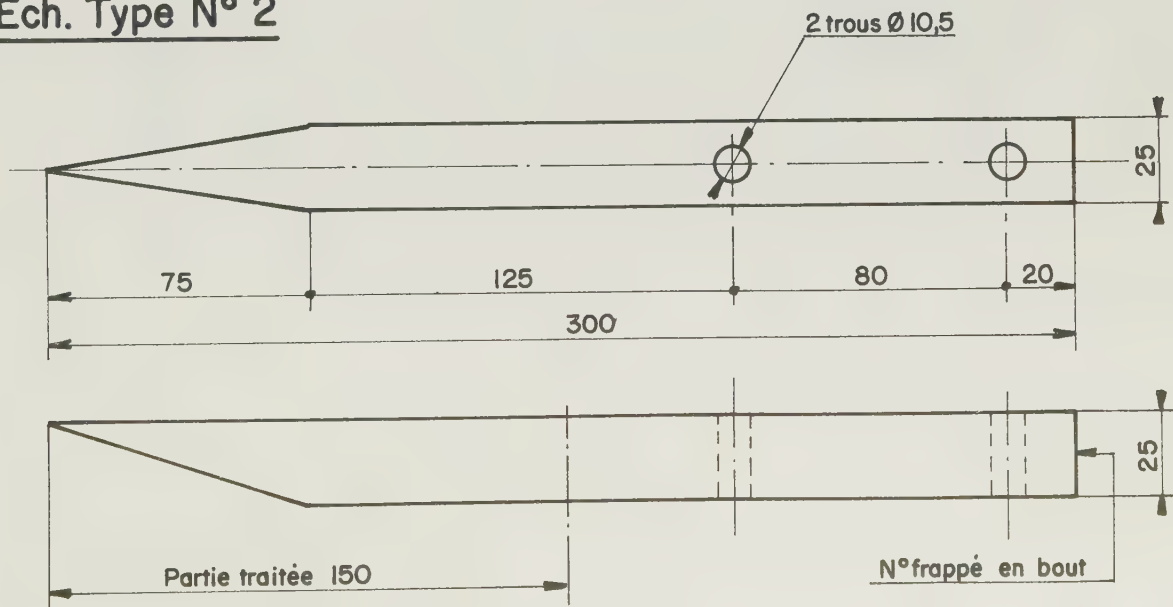
I.- ECHANTILLONS

Les échantillons utilisés pour les essais suivants étaient des formes simplifiées de socs de charrue et des dents de cultivateur. Les premiers étaient rectangulaires et les autres étaient faits comme des dents (figure 23). Comme pour les expériences au laboratoire, ces échantillons traités à chaud, étaient en acier 45 S 8. Leur dureté était de 550 V environ. Ils ont été montés sur le bâti d'une charrue tirée par un tracteur (figure 24). Les pièces

Fig.23- ECHANTILLONS SIMPLIFIES
pour un ESSAI d'ABRASION dans le CHAMP

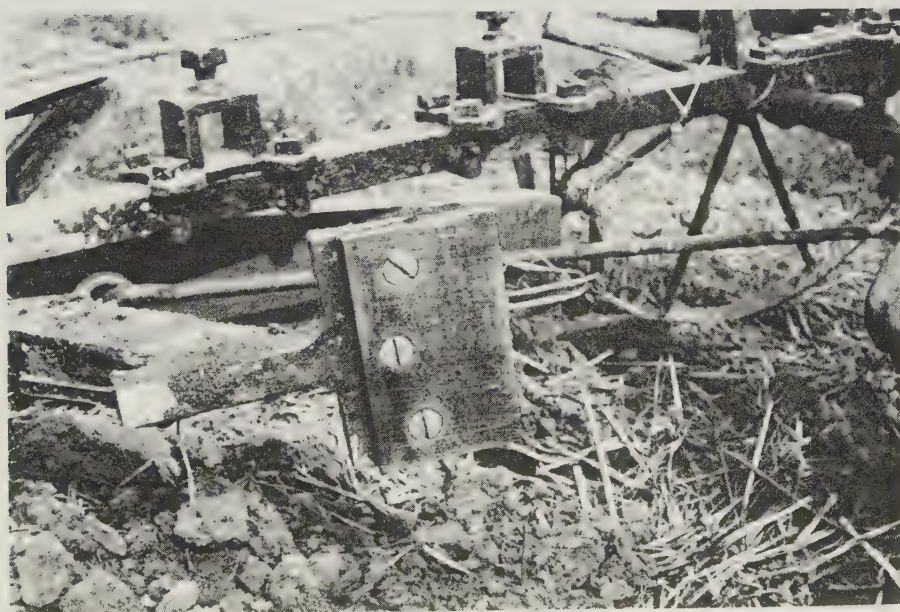


Ech. Type N° 2





**Fig. 24 - Vue d'ensemble de montage d'essai
dans le champ**



**Fig. 25 - Fixation d'échantillon sur le bâti
d'une charrue**

sont montées une par une et sont disposées suivant un angle qui facilite la pénétration dans le sol. On ajoute un poids de 50 kg au bâti de la charrue, pour que la profondeur de travail reste constante. Cette profondeur était de 20 cm pour le soc de charrue et de 15 cm pour la dent du cultivateur.

Bien que les surfaces des échantillons soient polies et leurs angles coupants aiguisés, on les faisait travailler dans le champ sur une distance de 100 mètres, avant l'expérience. Ceci devait servir de test préliminaire, former leurs angles et stabiliser leurs surfaces d'usure.

II.- LE CHAMP

Nos essais ont été effectués dans un champ d'un village voisin. Nous avons choisi une surface de 6 hectares environ. Elle était plane et sa texture était à peu près la même partout. La partie supérieure du terrain présentait quelques pierres de taille différente dont le diamètre pouvait atteindre jusqu'à 3 cm. Nous avons adopté un tracé de blocs divisés au hasard et limité l'erreur générale à moins de 5% de l'usure moyenne. Le terrain a été délimité à l'aide de jalons de deux mètres de hauteur. On a formé ainsi un ou plusieurs rectangles, qui étaient eux-mêmes divisés en quatre zones. La figure 26 montre le tracé du terrain qui a servi à comparer l'usure à des vitesses différentes.

Chaque échantillon a effectué deux passages, à chaque vitesse, dans les quatre emplacements. Nous avons laissé de côté cent mètres environ de terrain au bout du champ et nous nous en sommes servis pour l'essai préliminaire et la stabilisation des surfaces d'usure des échantillons.

C.- EXPERIENCE ET RESULTATS

Les échantillons étaient pris au hasard et ils effectuaient deux parcours, accomplissant ainsi 2 km chacun dans les quatre zones. Après l'essai préliminaire et après cette expérience, ils étaient nettoyés, séchés et pesés sur une balance de précision $\pm 0,01$ gm. Le tracteur était conduit entre les deux traces de roues du passage précédent. Les échantillons travaillaient donc toujours dans un terrain non labouré et la ligne restait droite. Chaque zone était ainsi entièrement travaillée à partir d'un de ses côtés. Pour mesurer la traction de la charrue, nous avons utilisé un dynamomètre enregistreur à tendeur hydraulique. La traction et la profondeur de travail de la charrue qui ont été réglées pendant l'essai préliminaire, ont été mesurées à plusieurs reprises au cours de l'expérience. Les résultats à chaque vitesse, ont été obtenus en faisant la moyenne de deux expériences.

En Octobre 1968, nous avons effectué quelques expériences avec des socs de charrue et des dents de cultivateur. Nous avons commencé par faire cinq essais avec les deux types d'échantillons pour nous assurer de la reproductibilité et de la validité des expériences. Ils ont été réalisés à une vitesse constante de 4 km/h et à une profondeur constante de 21 cm pour le soc de charrue et de 16 cm pour les dents de cultivateur. Les résultats en sont donnés dans le tableau ci-après :

Fig. 26- TRACE du TERRAIN

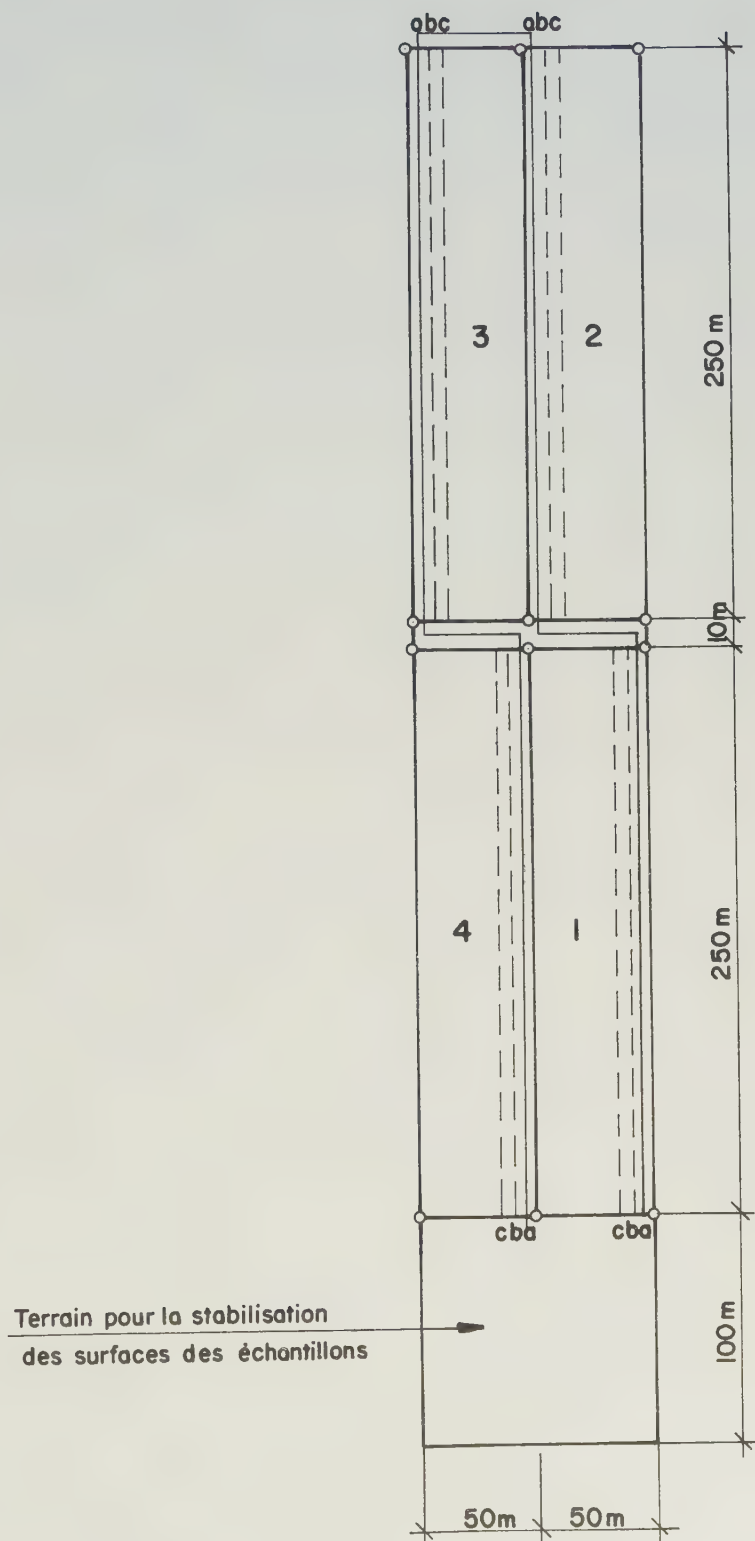


TABLEAU 6

RESULTATS DES ESSAIS DE REPRODUCTIBILITE
POUR DES SOCS ET DES DENTS DE CULTIVATEUR

Usure en grammes	
Socs	Dents
1,45	2,80
1,25	2,76
1,40	2,72
1,30	2,80
1,32	2,64

Ce tableau indique des variations peu importantes, ce qui montre que les changements dus aux diverses conditions du sol ont été affaiblis par la division du champ. L'erreur générale d'usure moyenne dans les deux cas était de l'ordre de 3% environ, ce qui se trouvait dans les limites prévues. Nous avons donc pu poursuivre nos essais. Les résultats des expériences effectuées en 1968 aussi bien sur les socs que sur les dents ont été portés aux tableaux 7 et 8, et leur représentation graphique, aux figures 27 et 28.

Les expériences n'ont pas pu être poursuivies à cause d'un changement des conditions atmosphériques, qui a affecté le sol. D'autre part, l'effort n'a pas pu être mesuré à cause d'une défaillance du dynamomètre.

Comme il n'était pas possible de tirer de conclusions de ces essais, nous avons recommencé nos expériences en Octobre 1969 dans le même champ. Les conditions initiales du sol n'étaient plus les mêmes. Le sol était plus compact et plus dur et contenait moins d'humidité que l'année précédente. Les résultats de ces essais sont donnés dans les tableaux 9 et 10.

I.- EFFET DE LA VITESSE SUR L'USURE

Les figures 27 et 28, ainsi que les tableaux 7, 8, 9 et 10 montrent que l'usure augmente légèrement avec la vitesse de travail des outils, et cela aussi bien pour les socs de charrue que pour les dents de cultivateur. Il faut aussi noter que la nature des courbes représentant le rapport de l'usure sur la vitesse n'est pas la même suivant que l'expérience a lieu dans le champ ou au laboratoire (figures 13 et 21). Comme nos expériences ont été faites

Fig.27 RELATION entre la VITESSE et l'USURE
du SOC de CHARRUE

Effets de la vitesse sur l'usure des socs de charrue
dans le champ

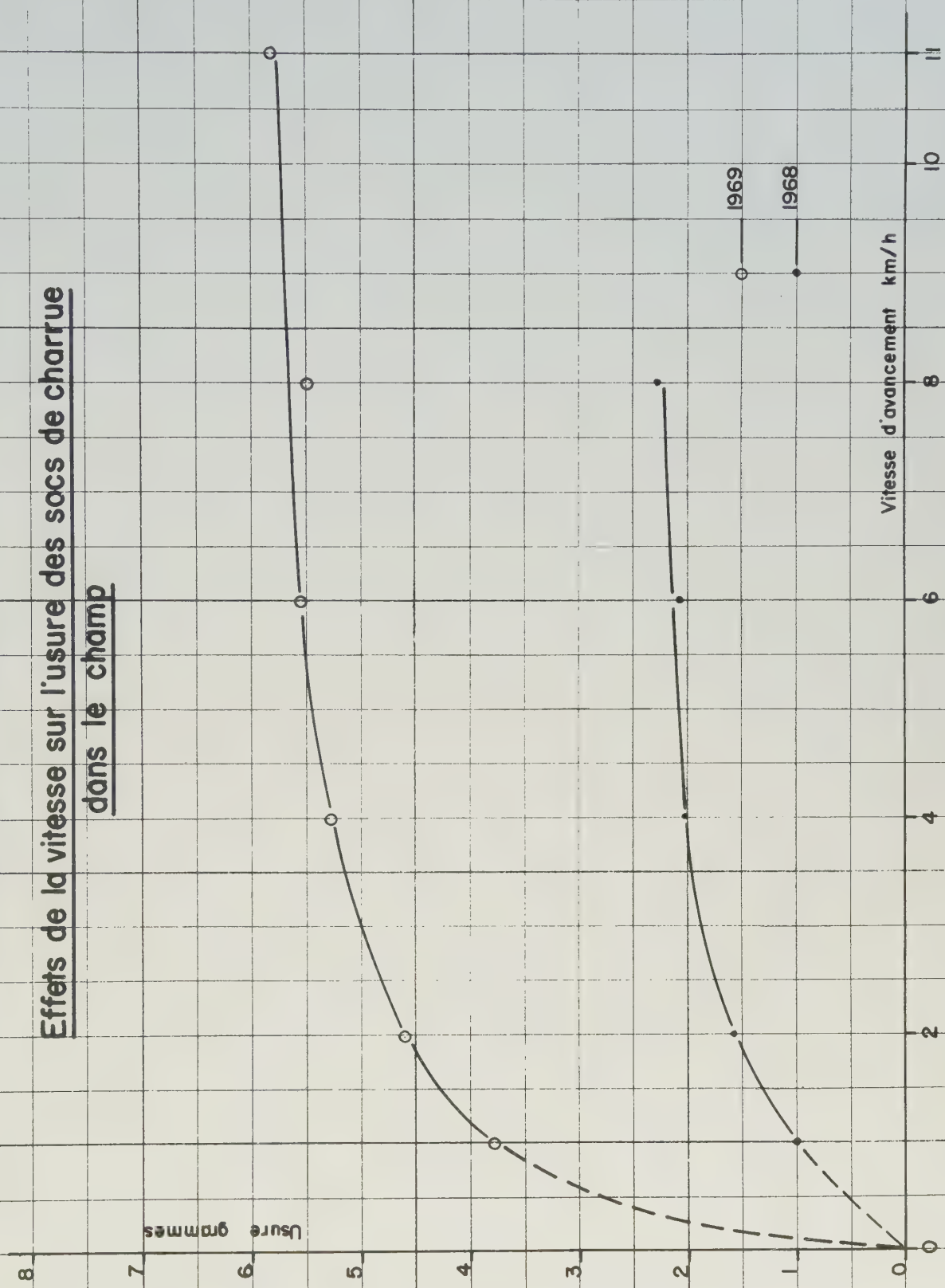
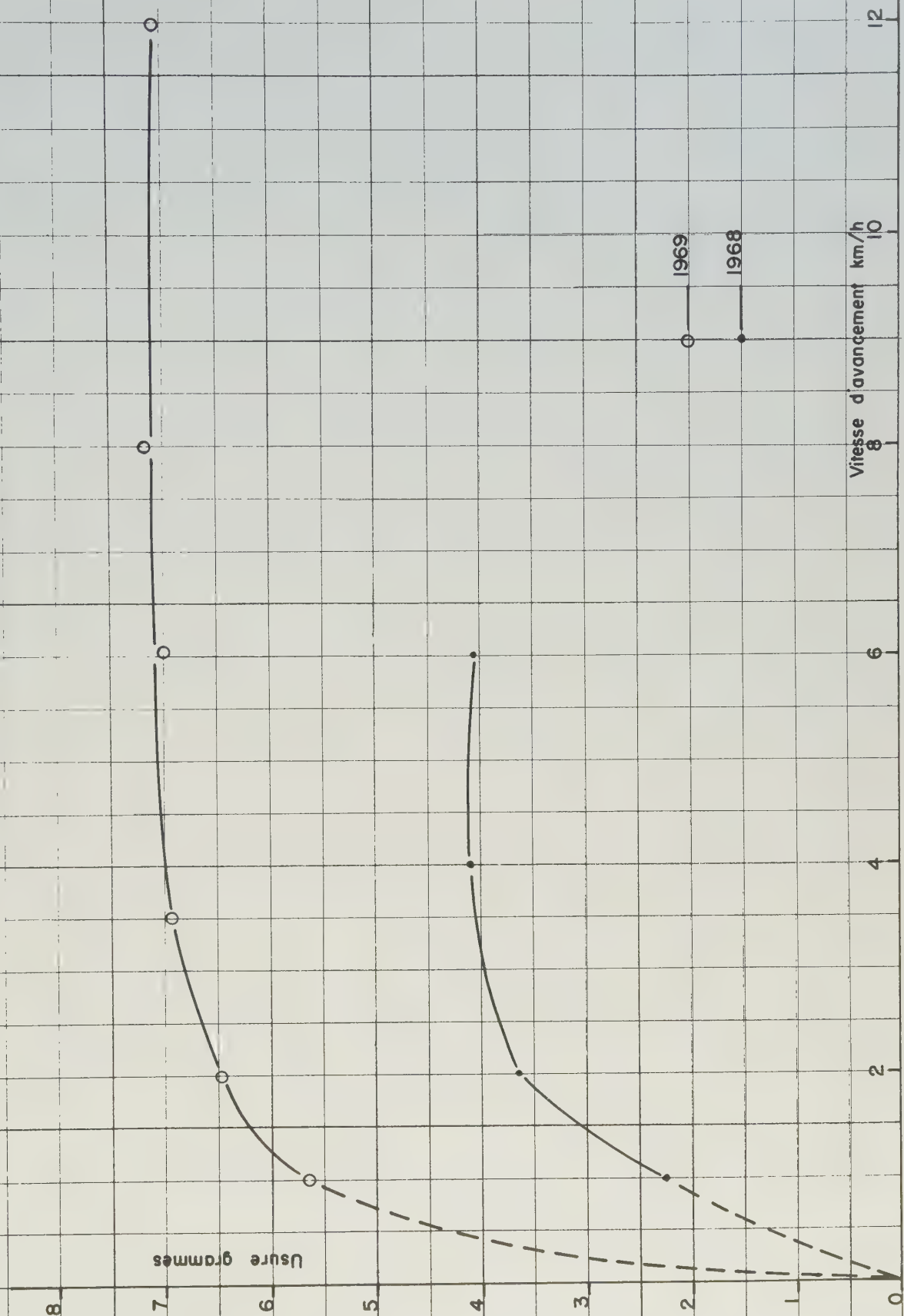


Fig. 28 EFFETS de la VITESSE sur l'USURE
des DENTS dans le CHAMP



deux ans de suite (1968 et 1969), et que nous avons obtenu des résultats similaires pour les deux années, nous pouvons considérer ces résultats comme fiables.

Les figures 27 et 28 montrent que l'élévation de l'usure provoquée par l'augmentation de la vitesse n'est pas très importante. Nous avons déjà trouvé ce résultat dans le cas de l'abrasion sous forte contrainte au laboratoire. Il est valable aussi bien pour les socs que pour les dents. Dans le cas des socs de charrue, quand la vitesse passe de 1 à 11 km/h, l'usure passe de 3,92 à 5,85 gm. Elle n'augmente donc que d'une fois et demie. Dans le cas des dents de motoculteur, l'augmentation de l'usure est encore plus faible. Ces résultats confirment ceux de RICHARDSON (28) qui n'a pas trouvé un grand changement à des vitesses différentes.

Les divergences constatées dans l'usure totale à des vitesses déterminées en 1968 et 1969, proviennent des changements du sol. Comme nous l'avons déjà fait remarquer, au cours de la saison 1969, il contenait moins d'humidité et il n'avait pas été travaillé auparavant. Ceci montre clairement l'influence, sur l'usure d'un matériau dans le champ, (mise à part la structure du sol qui était ici la même) des autres facteurs, tels que l'humidité du sol, son état avant les expériences, etc...

Il faut aussi noter que la forme de l'outil est assez importante pour l'évaluation de l'usure totale (figures 27 et 28). Au cours des deux saisons, l'usure totale des dents de motoculteur était nettement supérieure à celle des socs de charrue. Mais cette différence n'est pas gênante pour la comparaison de la résistance relative à l'usure de deux ou de plusieurs matériaux dans le champ.

Etant donné la forme des courbes, il est possible d'affirmer que l'usure augmente exponentiellement à des vitesses comprises entre 1 et 4 km/h et qu'elle est presque constante à des vitesses supérieures. La quantité d'usure dans le champ peut être exprimée mathématiquement par l'équation suivante :

$$U = U_{\max} (1 - e^{-av}) \quad (1)$$

avec : $U = \text{Usure (gm)}$

$U_{\max} = \text{usure maximum (gm)}$

$v = \text{vitesse de travail (km/h)}$

$a = \text{constante}$

D'après nos résultats, nous avons calculé que (a) est à peu près égal à 1,2. L'équation devient donc :

$$U = U_{\max} (1 - e^{-1,2 v})$$

TABLEAU 7

RESULTATS DES ESSAIS D'ABRASION
DES SOCS DANS LE CHAMP (1968)

N°	Vitesse moyenne (km/h)	Profondeur de travail (cm)	Usure moyenne (gm)	Effort moyen (kg)
1	1,00	20,0	1,01	_____
2	2,00	20,0	1,54	_____
3	4,04	20,0	2,02	_____
4	5,90	19,5	2,20	_____
5	7,93	21,0	2,33	_____

TABLEAU 8

RESULTATS DES ESSAIS D'ABRASION
DES DENTS DANS LE CHAMP (1968)

N°	Vitesse moyenne (km/h)	Profondeur de travail (cm)	Usure moyenne (gm)	Effort moyen (kg)
1	1,00	15,5	2,25	_____
2	1,99	16,0	3,67	_____
3	4,01	15,0	4,10	_____
4	6,00	15,0	4,07	_____

TABLEAU 9

RESULTATS DES ESSAIS D'ABRASION
DES SOCS DANS LE CHAMP (1969)

N°	Vitesse moyenne (km/h)	Profondeur de travail (cm)	Usure moyenne (gm)	Effort moyen (kg)
1	0,99	20,0	3,82	305
2	2,01	20,0	4,63	320
3	4,07	19,5	5,20	370
4	6,08	20,0	5,60	390
5	8,06	19,0	5,54	441
6	10,95	21,0	5,85	459

TABLEAU 10

RESULTATS DES ESSAIS D'ABRASION
DES DENTS DANS LE CHAMP (1969)

N°	Vitesse moyenne (km/h)	Profondeur de travail (cm)	Usure moyenne (gm)	Effort moyen (kg)
1	1,00	17,5	5,72	245
2	2,02	16,5	6,50	251
3	4,00	16,3	6,98	260
4	5,86	16,0	7,02	274
5	7,95	16,8	7,20	292
6	12,15	16,0	7,15	305

L'augmentation de l'usure à des vitesses faibles de 1 à 4 km/h, peut être attribuée aux solutions aqueuses présentes dans le sol. Richardson (46) a suggéré que lorsque l'intensité de l'usure est faible, les propriétés du milieu aqueux ont un effet important. L'usure est alors dominée par les propriétés de la pellicule formée sur la surface du métal par interaction avec le milieu et non par les propriétés mécaniques du métal. Lorsque l'intensité de l'usure est plus forte, l'effet du milieu aqueux est généralement négligeable. Les taux d'usure de certaines parties des socs de charrues sont probablement affectés aussi par les solutions du sol alors que les bords coupants ne le sont sans doute pas.

II.- EFFET DE LA VITESSE SUR LA FORCE DE TRACTION

Les résultats de l'effet de la vitesse sur la force de traction pour les socs de charrue et les dents de motoculteurs sont portés respectivement aux tableaux 9 et 10, et représentés graphiquement à la figure 29. Cette figure montre que les forces de traction sont proportionnelles à la vitesse de travail des outils. Mais il faut noter que le taux d'augmentation de la traction provoquée par une vitesse plus grande n'est pas le même pour les deux outils.

III.- EFFET DES FORCES DE TRACTION SUR LA QUANTITE D'USURE

Les figures 30 et 31 indiquent que dans le cas des socs, lorsque la force de traction passe de 300 à 350 kg, la quantité d'usure augmente assez rapidement. Ce phénomène peut être également constaté dans le cas des dents de cultivateur, quand la traction passe de 230 à 260 kg. Mais au-delà de ces valeurs, l'usure est presque constante.

Ceci est presque évident, puisque la traction est fonction directe de la vitesse. La traction peut donc faire augmenter l'usure dans les mêmes proportions que la vitesse. Comme la différence de quantité d'usure est faible quand la traction augmente, on suppose pour des raisons pratiques, qu'elle est linéaire, bien que cela ne corresponde pas aux résultats obtenus au laboratoire. Il est possible d'expliquer cette contradiction en faisant remarquer que l'augmentation de la traction, qui est peu importante, dépend complètement de la vitesse. Comme l'augmentation de la vitesse élève peu l'usure, cette dernière augmentera peu avec les forces de traction. Il n'existe pas d'autre méthode directe pour amplifier la force de traction des outils dans le sol.

Le taux d'augmentation de l'usure par kg de traction diminue de la même façon que les résultats d'abrasion sous forte contrainte au laboratoire. Cette diminution est plus importante dans le champ qu'au laboratoire. Elle peut être attribuée au fait que, à des vitesses faibles, la tranche de sol coupée par le bord tranchant de l'outil, peut glisser doucement sur la surface du soc et rester ainsi en contact plus longtemps avec le soc, ceci provoque une usure plus grande de la surface autre que le bord coupant. A des vitesses élevées par contre, le sol, après avoir été coupé, peut être rejeté rapidement de la surface du soc et n'y cause pas d'abrasion. Si cela est vérifié, le phénomène est plus fiable à des vitesses élevées.

Fig.29-EFFETS de la VITESSE sur l'EFFORT de TRACTION
dans le CHAMP

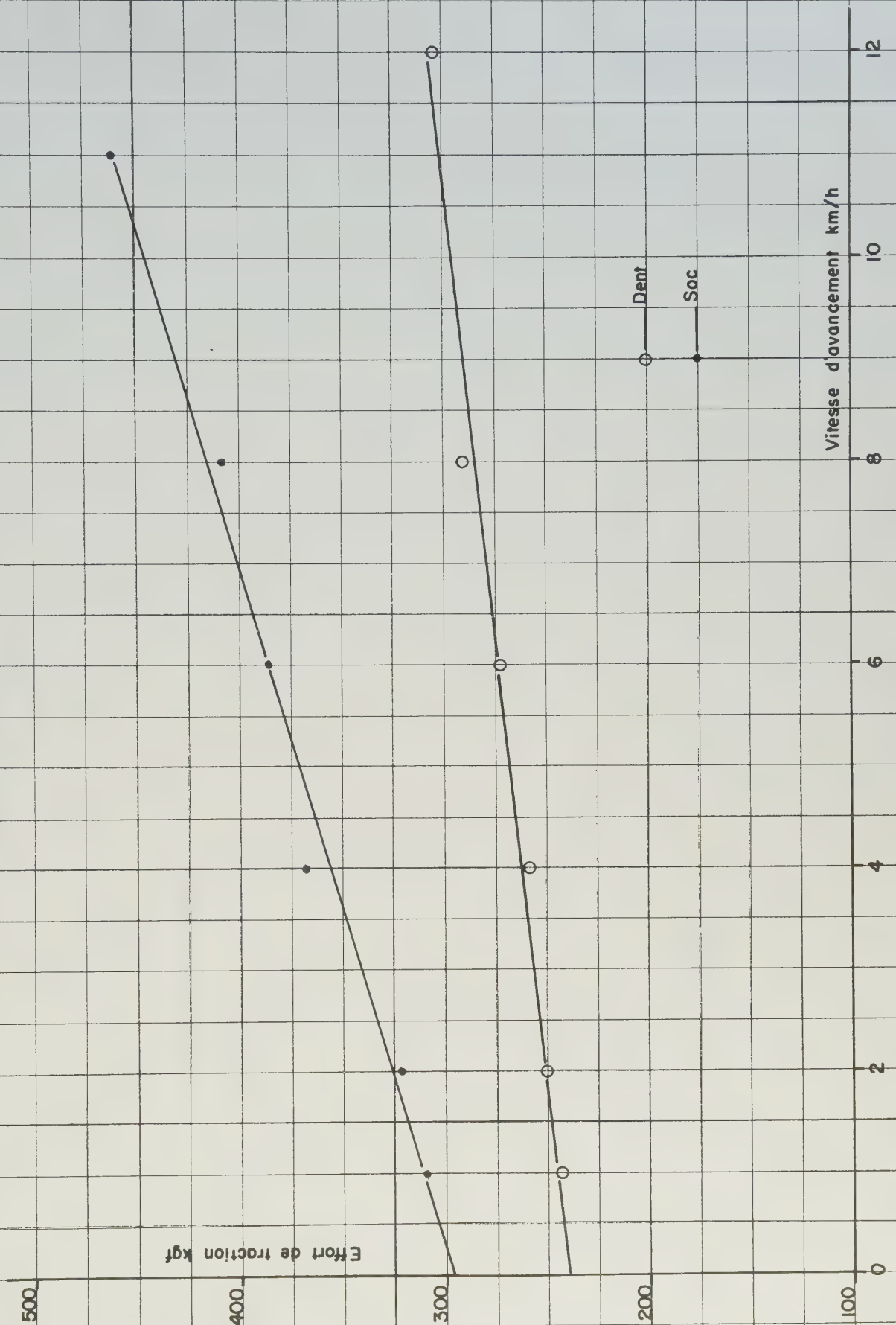


Fig.30 EFFETS de l'EFFORT de TRACTION
sur l'USURE des SOCS de CHARRUE
dans le CHAMP

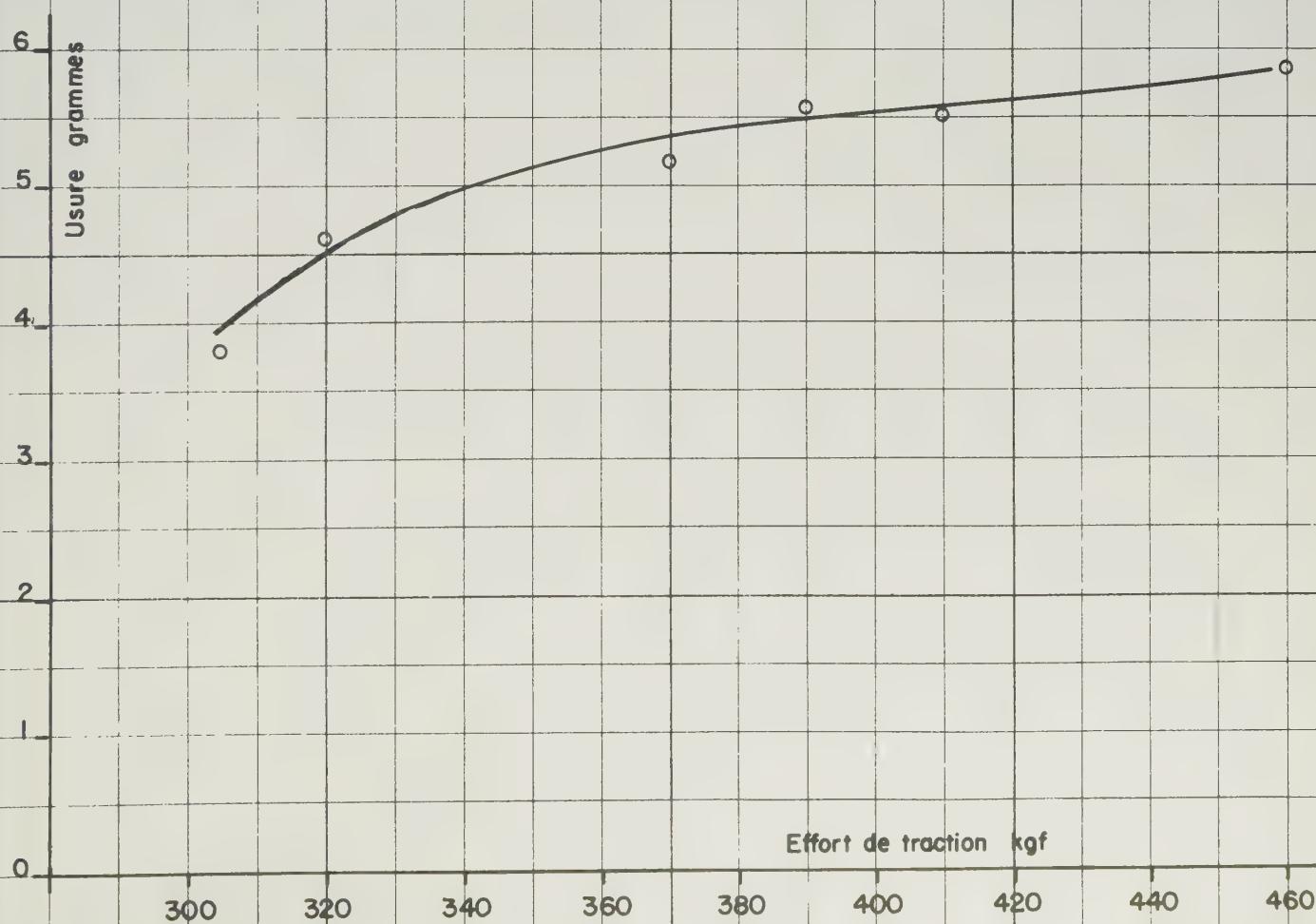
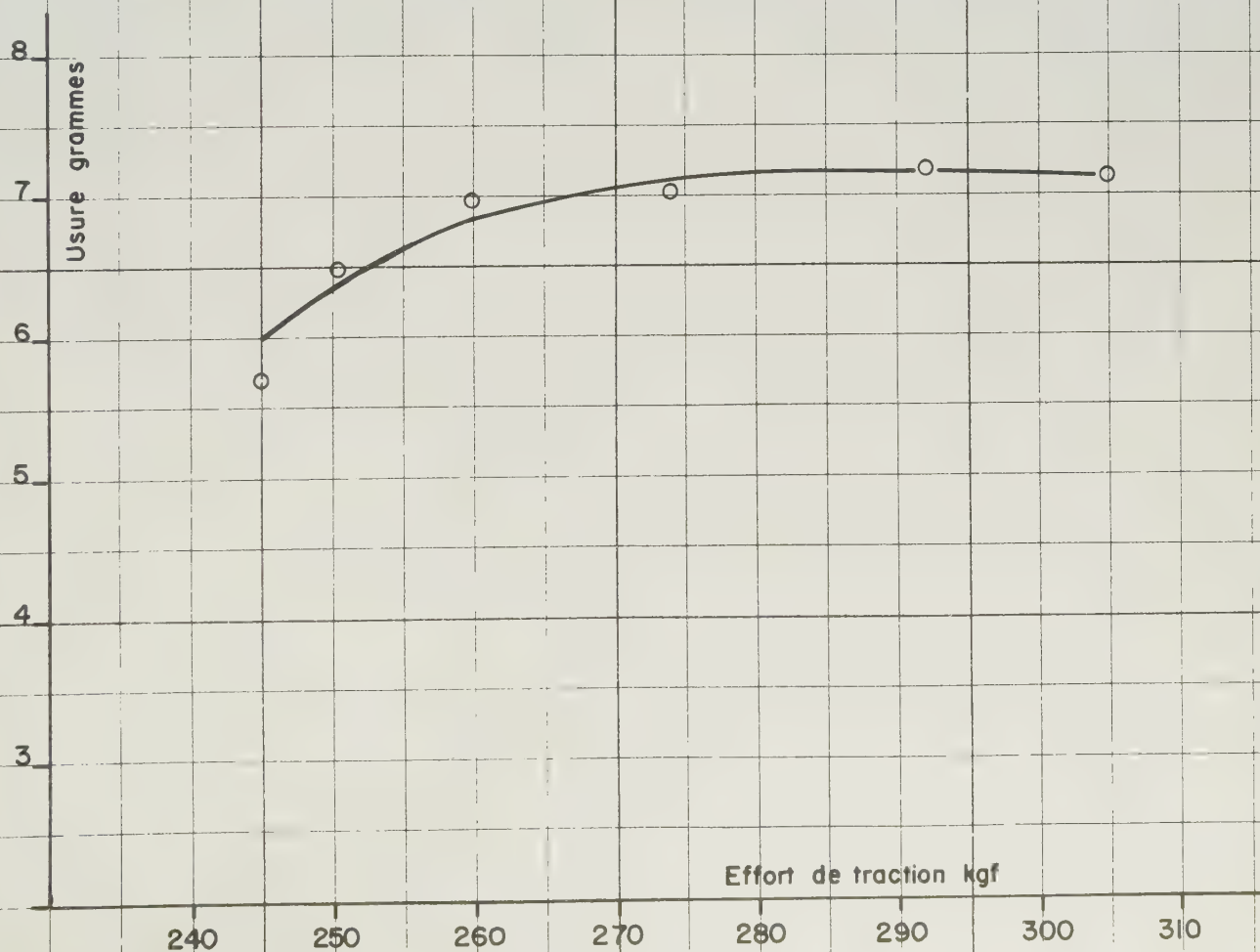


Fig.31 EFFETS de l'EFFORT de TRACTION
sur l'USURE des DENTS
de CULTIVATEUR dans le CHAMP



Ceci montre que l'usure par abrasion dans le champ, augmente avec la traction. Il est possible de comparer ce résultat à celui de la méthode d'abrasion sous forte contrainte. Mais, à cause de la nature complexe du sol, les courbes ne sont pas les mêmes pour les deux méthodes. On peut aussi faire remarquer que la quantité d'usure varie beaucoup suivant la forme de l'échantillon.

C O N C L U S I O N

Dans cette étude, nous avons tenté de trouver et de comparer trois méthodes différentes, pour l'essai de l'usure par abrasion des matériaux utilisés dans la fabrication des outils qui travaillent le sol.

Nous avons comparé, pour ces différentes méthodes, l'effet de la vitesse et de la force appliquée, sur la quantité d'usure, et nous avons trouvé :

- L'augmentation de l'usure avec la vitesse est très faible ou même négligeable, sauf pour les essais faits au laboratoire sous faible contrainte.
- La nature de l'augmentation de l'usure causée par la vitesse, diffère pour toutes ces méthodes.
- L'augmentation de l'usure est proportionnelle à celle de la charge.
- Dans le cas des essais dans le champ, l'usure ne dépend pas directement de la force de traction.
- Pour trouver la résistance relative à l'usure d'un matériau, il est important de connaître, en plus de sa dureté, sa composition chimique et son module d'élasticité.
- Un traitement thermique augmente la résistance à l'abrasion du matériau.
- La quantité d'usure dans le champ dépend de la forme de l'échantillon.

B I B L I O G R A P H Y

1. BURWELL J.T. Jr.,
"Survey of Possible wear Mechanisms", Wear, Vol. 1, N° 2,
(1957) PP. 119 - 141.
2. BURWELL J.T. et Strang C.D.,
Journal of Applied Physics, Vol. 23, (1952), p. 18.
3. Archard J.F.
Journal of Applied Physics, Vol. 24, (1953), p. 981.
4. AVERY, H.S.,
"The Measurement of wear Resistance", Wear, Vol. 4, N° 6,
(Nov/Déc. 1961), p. 427.
5. SERPIK N.M. et KANTOR M.M.,
"Povyshenie Dolgovechnosti Rabochikh Detalei Pochvoobratat-
tyvayushehikh Machin (Augmentation de la Longévité des Pièces
de Travail des Machines pour les Cultures du Sol)", Institute
des Machines de l'Académie des Sciences de l'URSS, Mashgiz,
Moscou, (1960), pp. 168-173.
6. RABINOWICZ, E., DUNN, L.A. et RUSSEL, P.G.
"A Study of Abrasive Wear Under Three-Body Conditions",
Wear, Vol. 4, N° 5, (Sept/Oct. 1961), p. 345.
7. MULHEARN, T.O. et SAMUELS, L.E.,
"The Abrasion of Metals : A Model of the Process", Wear,
Vol. 5, N° 6, (Nov/Déc. 1962), pp. 478-498.
8. GODDARD, J. et WILMAN, H.,
"A theory of Friction and Wear During the Abrasion of Metals",
Wear, Vol. 5, N° 2, (Mar/Avril 1962), pp. 114-135.
9. KHRUSCHOV, M.M.,
"Résistance of Metals to Wear by Abrasion, as Related to
Hardness", Proc. conf. on Lubrication and Wear, Inst. of
Mech. Engineers, London, (1957), p. 655.
10. AVIENT, B.W.E, GODDARD, J. et WILMAN, H.,
"An Experimental Study of Friction and Wear During Abrasion
of Metals", Proc. Roy. Society (London), Séries A, Vol. 258
(1960), pp. 159-180.
11. SEDRIKS, A.J. et MULHEARN, T.O.
"Mechanics of Cutting and Rubbing in Simulated Abrasive
Processes", Wear, Vol. 6, N° 6, (Nov/Déc. 1963), pp. 457-466.

12. KHRUSCHOV, M.M. et BABICHEV, M.A.
"Issledovaniva Iznashivaniya Metallov, (La Recherche dans l'Usure des Métaux)", Akad. Nauk, Moscou (1960), N.E.L., Traduction N° 889 et 893.
13. BOWDEN, F.P. et TABOR, D.
"The Friction and Lubrication of Solids"
Clarendon Press. Oxford (1964).
14. FINNIE, I.
"Erosion of Surfaces by Solid Particles", Wear, Vol. 3, (1960), pp. 87-103.
15. BITTER, J.G.A.
"A Study of Errosion Phenomena - Part I", Wear, Vol. 6, N° 1, (Jan/Fev 1963), pp. 5-21.
16. BITTER, J.G.A.
"A Study of Errosion Phenomena - Part II", Wear, Vol. 6, N° 3, (Mai/Juin 1963), pp. 169-190.
17. KHRUSCHOV, M.M. et BABICHEV, M.A.
Eriction and Wear in Machinery, Vol. 12, (1960), pp. 25-38.
18. HAWORTH, R.D.
"The Abrasion Resistance of Metals", Transaction of ASM, Vol. 41, (1949), pp. 819-869.
19. BORGHEI, A.M.
"Usure par Abrasion des Outils de Travail du Sol", Thèse présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris (1968).
20. NATHAN, G.K. et JONES, W.J.D.
"The Emperical Relationship Between Abrasive Wear and the Applied Conditions", Wear, Vol. 9, N° 4, (1966), pp. 300-309.
21. AVERY, H.S. et CAHPIN, H.J.
"Hard Facing Alloys of the Chromium Carbide Type", The Welding Journal, Vol. 31, N° 10, (1952), pp. 917-930.
22. STAUFFER, W.A.
"Wear of Metals by Sand Errosion", Metal Progress, Vol. 69, N° 1, (1956), pp. 102-107.
23. KHRUSCHOV, M.M. et BABICHEV, M.A.
Internation Lubrication conference, ASME paper N° 64-LUB-31 (1964)
24. MARATRAY, F.
"Les Processus d'Usure des Matériaux soumis à l'Abrasion"
Revue de l'Industrie Minérale, Numéro spécial (Fév. 1970), pp. 3-25.

25. KARATISH, A.
"Ob iznose rabochykh organov pochvoobrabaty-vayushchykh ovudii (The Wear of the working elements of soil cultivation implements)", Mashino-Trakt Stants, 15 (11) (1955), N.I.A.E. traduction N° 29.
26. KHRUSCHOV, M.M. et BABICHEV, M.A.
"Experimental Fundamentals of Abrasive Wear Theory", Russian Engineering Journal, Issue, N° 6, (1964), pp. 43-47.
27. RICHARDSON, R.C.D.
"The Wear of Metals by Hard Abrasives" Wear, Vol. 10, (1967), pp. 291-309.
28. RICHARDSON, R.C.D.
"The Maximum Hardness of Strained Surfaces and the Abrasive Wear of Metals and Alloys", Wear, 10 (1967), pp. 353-382.
29. LARSEN - BODSE, J.
"The Abrasion Resistance of Some Hardend and Tempered Carbon Steels", Trans. AIME, 236 (Oct. 1966), pp. 1461-1466.
30. SAVITSKYI, K.V.
Iznos i iznosostockosty antigrikshionnyie materialyi (3ème conférence sur le frottement et l'usure dans les machines), Institut des machines de l'Académie des Sciences de l'URSS, Mashgiz, Moscou (1960), pp. 230-239.
31. RABINOWICZ, E.
"Friction and Wear of Materials", John Wiley and Sons. Inc. New York (1965).
32. ROSENBLATT, D.N.
"Melting Practice, Heat Treatment, and Properties of Low - Alloy Wear-Resistant Steels", Proceedings, Electric Furnace Conference, 21 (1965), pp. 193-208.
33. HAWORTH, R.D.
Metal Progress, Vol. 55, N° 6, (1949), pp. 842-848.
34. NORMAN, T.E. et LOEB, C.M.
"Wear Test in Grinding Balls", Trans. AIME, 176 (1948), pp. 490-526.
35. DEARDEN, J. et SWINDALE, J.D.
"Effect of Alternate corrosion and Abrasion on some Ferrous Metals", Journal of Iron Steel Institute, Vol. 185 (Fév. 1957) pp. 227-234.
36. OBERLE, T.L.
Journal of Metals (U.S.A.), Vol. 3, N° 6, (1951), pp. 438-439.
37. SPURR, R.T. et NEWCOMB, T.P.
"The Friction and Wear of Various Materials Sliding Against Unlubricated Surfaces of Different Types and Degrees of Roughness", Proc. Conf. on Lubrication and Wear, Inst. of Mech. Engineers, London (1957), pp. 269-275.

38. BABICHEV, M.A., VELIKANOVA, A.A. et KRAPOSHINA, L.B.
Akad. Nauk URSS, Inst. Mash. Ved. Trenie i Iznos v Mashinakh,
Vol. 15, (1962), pp. 11-30.
39. SOROKO-NOVITSKAYA, A.A.
Friction and Wear in Machinery, Vol. 13, (1961), pp. 5-18.
40. PIGGOT, M.R. et WILMAN, H.
"Nature of the Wear and Friction of Mild Steel on Mild Steel
and the effect of Surface Oxide and Sulphide Layers"
Article présenté à la conférence sur "Lubrication and Wear",
on I.M.E. London (Oct. 1957).
41. WELSH, N.C.
"Structural Changes in rubbed Steel Surfaces", Article pré-
senté à la conférence sur "Lubrication and Wear" I.M.E.
London, (Oct. 1957).
42. REED, I.F. et GORDON, E.D.
"Determining the Relative Wear Resistance of Metals",
Agricultural Engineering, (Février 1951), pp. 98-100
43. BOWDITCH, H.G.
"Analysis of Wear of Scarifier Shares", Journal Agricultural
Engineering Research, Vol. 14, N° 1, (1969), pp. 32-39.
44. BOWDEN, F.P. et TABOR, D.
"The Friction and Lubrication of Solids", Clarendon Press,
Oxford (1950).
45. DRAIGNAUD, P.
"Recherche d'un test rapide d'abrasivité", Bulletin de la
Sté Française de Céramique, 4 (Oct.-Déc. 1958), pp. 47-64.
46. RICHARDSON, R.D.
"Wear in Agricultural Machinery - The Relevance of a Study
of the Wear of Materials Against Bonded Abrasive". J. et
Proc. Inst. of Agricultural Engineers, Vol. 19, N° 2 (1963),
pp. 42-53.
47. MAYOUSKAS, I.S.
Idem, (1960), pp. 99-115.
48. ZINK, F.J. SELLERS, G.A. et ROBERTS, J.
"Results of Studies of the Cutting Edges of Tillage Tools"
Agricultural Engineering, Vol. 17, (Mar. 1936), pp. 93-97.
49. CROOK, A.W.
"Some Studies of Wear" Wear, Vol. 2, N° 5 (1959), pp. 364-393.
50. BLAKE, J.M.
"Wear Testing of Various Types of Steel", Proc. A.S.T.M.,
Vol. 28, Part. II, (1928), pp. 341-355.
51. MOHSENIN, N., WOMOCHEL, H.L., HARVEY, D.J. et CARLETON, W.M.
"Wear Tests of Prow Share Materials", Agricultural Engineering
Vol. 37, N° 12, (1956), pp. 816-820.

